



HAL
open science

Réponses hémodynamiques et métaboliques des muscles paravertébraux à l'exercice : influence de la lombalgie chronique et de la pratique d'activités physiques

Agathe Anthierens

► To cite this version:

Agathe Anthierens. Réponses hémodynamiques et métaboliques des muscles paravertébraux à l'exercice : influence de la lombalgie chronique et de la pratique d'activités physiques. Médecine humaine et pathologie. Université de Lille, 2019. Français. NNT : 2019LILUS009 . tel-02495348v2

HAL Id: tel-02495348

<https://theses.hal.science/tel-02495348v2>

Submitted on 11 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Université de Lille
Faculté des Sciences du Sport et de l'Éducation Physique**

THESE

Présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur de l'Université de Lille
en Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives

**REPONSES HEMODYNAMIQUES ET METABOLIQUES DES
MUSCLES PARAVERTÉBRAUX A L'EXERCICE: INFLUENCE
DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE ET DE LA PRATIQUE
D'ACTIVITES PHYSIQUES**

Soutenue publiquement par

Agathe ANTHIERENS

Le 14 mai 2019

Présentée devant le jury composé de :

M. Patrick MUCCI	Professeur à l'Université de Lille (Directeur)
M. Nicolas OLIVIER	Maitre de conférences à l'Université de Lille (Co-encadrant)
M. Fabrice PRIEUR	Maitre de conférences (HDR) à l'Université d'Orléans (Rapporteur)
M. Thierry WEISSLAND	Maitre de conférences (HDR) à l'Université de Bordeaux (Rapporteur)
M. Jan BOONE	Professeur à l'Université de Gand (Belgique) (Examinateur)
M. André THEVENON	Professeur à l'Université de Lille (Examinateur)
Mme. Claire TOURNY	Professeur à l'Université de Rouen (Examinatrice)
Mme. Claudine FABRE	Professeur à l'Université de Lille (Examinatrice)

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Patrick Mucci, Professeur à l'Université de Lille qui m'a encadrée tout au long de cette thèse et sans qui l'aboutissement de cette thèse n'aurait jamais été possible. Je le remercie pour m'avoir dirigée ainsi que pour avoir été si attentif et disponible au cours de ces quatre dernières années, toujours avec patience et bienveillance. Je remercie également Nicolas Olivier, qui a accepté de m'encadrer dès mon master 1 puis de me co-encadrer dans le cadre de cette thèse, et sans qui je n'aurais peut-être jamais découvert les joies de la spectroscopie proche infrarouge, ni de la lombalgie chronique.

Merci à Serge Berthoin, de m'avoir accueillie au sein du laboratoire, et aux autres membres de l'Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société, et plus particulièrement à Frédéric Daussin qui a contribué à ces travaux de recherche.

Je tiens également à remercier Pr. André Thevenon et tout le personnel de l'hôpital Swynghedauw qui m'a aidé à mener à bien les expérimentations, et plus particulièrement Charlotte Logiou.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude aux enseignants de la faculté des Sciences et Techniques des Activités Physique et Sportive d'Amiens, qui sont ceux qui m'ont donné envie de faire de la recherche.

Un grand merci à Monsieur Thierry Weissland et Monsieur Fabrice Prieur. Ils ont d'abord accepté de me suivre au cours de mes années de thèse au sein du comité de suivi individuel, puis d'être rapporteurs lors de ma soutenance de thèse. Je leur suis très reconnaissante pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. Merci également à Madame Claire Tourny, Madame Claudine Fabre et Monsieur Jan Boone d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Mais aussi...

Puisque l'écriture d'une thèse fait partie intégrante de la vie d'un doctorant, une ribambelle de personnes mérite d'être remerciée pour avoir non seulement contribué, chacune à leur manière à la réalisation de ces travaux, mais surtout pour avoir contribué à rendre ma vie aussi belle .

La thèse est une aventure. Et une aventure serait bien insipide si elle n'était pas partagée avec quelques bons collègues. Ces cinq dernières années n'auraient pas été les mêmes, sans les personnes qui m'ont accompagnée à travers cette thèse. Alors, je tiens très particulièrement à remercier Mehdi et Baptiste. Ils ont été les premiers à me tendre la main, dès le début de cette grande aventure. Merci à Samir, avec qui j'ai partagé l'*open space* et le *weightlifting space*. Merci à Clément qui est apparu (trop) tardivement dans ma vie de doctorante, pour sa bonne humeur et son enthousiasme infaillibles. Et merci à Elodie pour son énergie et son sourire ... Merci également à Pierre, Sarah, Matthias, Alessandro et Khaoula avec qui j'ai partagé un bout de chemin ! Merci aux personnes qui ont été sollicitées un jour pour relire des bouts de thèse, ainsi qu'à Rémy and Michael, 4 helping wiz English.

Et à côté de tous ce beau monde issu du milieu (plus ou moins) scientifique, il y a l'amitié. L'amitié n'a pas de raison, l'amitié peut être irrationnelle. C'est probablement pour cela que vous avez accepté de m'écouter parler d'oxygénation, de muscles paravertébraux et de lombalgie chronique pendant ces quatre dernières années. Merci à Romain, mon meilleur ami. Merci à Chachou qui apparaît comme un soleil dans les meilleurs et les pires moments. Merci à Laura, Christophe et à Maxime. Je ne serai pas la même sans une bande de copains pareille.

Merci à Antoni, ma source d'oxygène. Merci de chanter, de danser, et d'exister.

Merci à ma mère et à mon père, à ma sœur, à mon papi.

Merci à toutes les autres personnes que j'ai aimées, que j'aime et que j'aimerai, et qui ne liront peut-être jamais ces quelques lignes.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	- 3 -
TABLE DES MATIERES	- 5 -
INDEX DES FIGURES	- 7 -
INDEX DES TABLEAUX	- 10 -
INDEX DES EQUATIONS	- 10 -
LISTE DES ABREVIATIONS	- 11 -
RESUME	- 12 -
INTRODUCTION	- 14 -
PARTIE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	- 17 -
CHAPITRE 1 LE RACHIS ET LE METABOLISME AEROBIE <i>RAPPELS ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES</i>	- 18 -
I) L'ANATOMIE DU RACHIS ET SES COMPOSANTES	- 18 -
1. Les vertèbres	- 18 -
2. Le disque intervertébral	- 19 -
3. Les ligaments rachidiens	- 19 -
4. Les muscles impliqués pour la mobilité et la stabilité du rachis	- 20 -
II) LA CONTRIBUTION DU METABOLISME AEROBIE AU COURS D'UN EXERCICE MUSCULAIRE	- 25 -
1. Le rôle de l'oxygène	- 25 -
2. Transport et utilisation de l'oxygène par le muscle : l'oxygénation musculaire	- 25 -
3. La consommation maximale en oxygène	- 26 -
4. Le coût en oxygène au cours d'un exercice sous-maximal	- 26 -
5. La cinétique de $\dot{V}O_2$	- 29 -
6. Le métabolisme aérobie des muscles paravertébraux : apport de la spectroscopie proche infrarouge	- 33 -
CHAPITRE 2 LA LOMBALGIE CHRONIQUE	- 38 -
I) LA LOMBALGIE CHRONIQUE	- 38 -
1. L'épidémiologie de la lombalgie	- 38 -
2. L'étiologie de la lombalgie	- 39 -
3. Les facteurs de risque de la lombalgie et du passage à la chronicité	- 42 -
II) SYMPTOMES ET PHYSIOPATHOLOGIE DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE	- 45 -
1. Les sensations de douleur	- 45 -
2. Le versant psychosocial	- 45 -
3. Les capacités musculaires	- 46 -
4. Les réponses neuromusculaires	- 49 -
5. L'aptitude aérobie	- 52 -
6. La consommation en oxygène à l'exercice sous maximal	- 57 -
7. Les réponses hémodynamiques et métaboliques à l'exercice sous-maximal	- 58 -
8. La spirale du déconditionnement	- 63 -
III) LE TRAITEMENT DE LA LOMBALGIE	- 65 -
1. Évolution de la prise en charge	- 65 -
2. Le modèle biopsychosocial	- 66 -
CHAPITRE 3 LA PRATIQUE CHRONIQUE D'ACTIVITES PHYSIQUES: EFFETS CHEZ LE SPORTIF ET CHEZ LE LOMBALGIQUE CHRONIQUE	- 68 -
I) INFLUENCE DE LA PRATIQUE D'ACTIVITES PHYSIQUES ET SPORTIVES	- 68 -
1. Les bienfaits généraux pour la santé	- 68 -
2. Les effets de la pratique d'activités physiques et sportives	- 69 -
3. Deux exemples de pratiques sportives aux modalités d'entraînement différentes	- 72 -
II) LA PRISE EN CHARGE DU LOMBALGIQUE CHRONIQUE PAR L'ACTIVITE PHYSIQUE	- 75 -
1. Les objectifs de prise en charge	- 75 -
2. Les effets d'une prise en charge par l'activité physique	- 76 -
3. Les modalités d'exercice pour le traitement de la lombalgie	- 77 -
III) LES PROGRAMMES DE RESTAURATION FONCTIONNELLE	- 80 -
1. Objectifs et modalités de prise en charge	- 80 -

2.	Les effets de la prise en charge pluridisciplinaire pour la restauration fonctionnelle du rachis	- 81 -
3.	Effets à long terme d'un programme de restauration fonctionnelle du rachis	- 84 -
4.	Reprise des activités professionnelles et quotidiennes	- 85 -
PARTIE 2 ORIENTATION DE TRAVAIL ET OBJECTIFS		- 88 -
I)	CONTEXTE	- 89 -
II)	PROBLEMATIQUES	- 90 -
III)	OBJECTIF	- 91 -
PARTIE 3 MATERIELS ET METHODES		- 92 -
I)	PARTICIPANTS	- 93 -
II)	PROTOCOLE EXPERIMENTAL	- 94 -
1.	Plan des études	- 94 -
2.	Tests isocinétiques	- 97 -
3.	Matériels utilisés pour l'évaluation des réponses métaboliques et hémodynamiques	- 100 -
4.	Évaluations spécifiques aux patients lombalgiques chroniques	- 106 -
III)	ANALYSES STATISTIQUES	- 108 -
1.	Comparaison de variables dépendantes	- 108 -
2.	Analyse des évolutions des variables pendant l'exercice	- 109 -
3.	Corrélations entre l'évolution de deux variables	- 109 -
PARTIE 4 LISTE DES COMMUNICATIONS ET DES PUBLICATIONS		- 110 -
PARTIE 5 PRESENTATION DES ETUDES		- 113 -
ÉTUDE 1		- 114 -
DESOXYGENATION DES MUSCLES PARAVERTÉBRAUX ET IMPLICATION NEUROMUSCULAIRE DES MUSCLES AGONISTES ET ANTAGONISTES AU COURS D'UN EXERCICE ISOCINETIQUE D'EXTENSION DU TRONC		
ÉTUDE 2		- 123 -
REPONSES DU METABOLISME AEROBIE DES MUSCLES PARAVERTÉBRAUX : INFLUENCE DE L'ENTRAINEMENT ET DE LA SPECIALITE SPORTIVE		
ÉTUDE 3		- 133 -
REPONSES DU METABOLISME AEROBIE DES MUSCLES PARAVERTÉBRAUX : INFLUENCE DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE		
ÉTUDE 4		- 142 -
BENEFICES D'UN PROGRAMME DE RESTAURATION FONCTIONNELLE DE 4 SEMAINES CHEZ LES LOMBALGIQUES CHRONIQUES ET SUIVI A 3 MOIS		
PARTIE 6 DISCUSSION GENERALE		- 156 -
I)	CONSIDERATION METHODOLOGIQUE : LE « MODE ARTHROMOTEUR »	- 157 -
1.	L'exercice maximal	- 157 -
2.	Les exercices sous-maximaux	- 158 -
II)	REPONSES AEROBIES AU COURS DES EXERCICES SOUS-MAXIMAUX	- 159 -
1.	L'ajustement de l'oxygénation et du volume sanguin des muscles paravertébraux à l'exercice	- 159 -
2.	Les effets sur l'efficacité mécanique	- 161 -
3.	Les effets sur la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$	- 161 -
III)	LA PRATIQUE D'ACTIVITES PHYSIQUES CHEZ LES LOMBALGIQUES CHRONIQUES	- 162 -
1.	Les sensations de douleur	- 163 -
2.	Impact sur la force, la fatigabilité et les capacités aérobies musculaires	- 164 -
CONCLUSION		- 166 -
PERSPECTIVES		- 167 -
RÉFÉRENCES		- 170 -
ANNEXES		- 192 -

INDEX DES FIGURES

FIGURE 1 Anatomie du rachis en vue ventrale et d'une vertèbre lombaire en vue supérieure.	- 19 -
FIGURE 2 Ligaments et vertèbres du rachis lombaire en vue latérale.	- 20 -
FIGURE 3 Muscles du rachis en couche intermédiaire et en couche profonde.	- 21 -
FIGURE 4 Muscles grands glutéaux et ischio-jambiers en vue latérale et en vue postérieure.	- 23 -
FIGURE 5 Représentation de l'implication des muscles paravertébraux, biceps fémoraux et grands glutéaux au cours d'un exercice prolongé d'extension du tronc.	- 24 -
FIGURE 6 Principales étapes pour la formation de molécules d'adénosine triphosphate par la filière aérobie.	- 25 -
FIGURE 7 Cinétique de $\dot{V}O_2$ en fonction de l'intensité de l'exercice et modélisation mono-exponentielle au cours d'un exercice à intensité modérée et constante.	- 30 -
FIGURE 8 Diminution et augmentation du volume sanguin musculaire au regard des muscles paravertébraux, enregistrées par spectroscopie proche infrarouge, pendant le test de Sorensen.	- 34 -
FIGURE 9 Images obtenues par résonance magnétique d'un cas de hernies au niveau des disques situés entre les vertèbres L4-L5 et L5-S1 et par CT-scan montrant un cas de spondylolisthésis de L4 sur L5.	- 40 -
FIGURE 10 Relation en U entre le niveau d'activité physique et le risque de développer une lombalgie.	- 42 -
FIGURE 11 Position du test de Sorensen.	
FIGURE 12 Dynamomètre isocinétique composé d'un moteur et d'un module rachis.	- 48 -
FIGURE 13 Représentation du <i>pain-spasm-pain model</i> et du <i>pain-adaptation model</i> .	- 50 -
FIGURE 14 $\dot{V}O_2$ max estimé par la formule de Bruce chez des sujets sains actifs, sédentaires et des lombalgiques chroniques en fonction de l'âge.	- 56 -
FIGURE 15 Cercle vicieux du déconditionnement physique et psychosocial du lombalgique.	- 63 -
FIGURE 16 Modèle conceptuel de la douleur (modèle de Loeser) et modèle clinique de la douleur (modèle de Waddell).	- 67 -
FIGURE 17 Surface de section des artères subclavière et fémorale rapportée à la surface du corps chez des sujets non-sportifs, des cyclistes et des tennismen.	- 71 -
FIGURE 18 Moment de force développé lors d'une extension du tronc maximale et consommation maximale en oxygène chez des judokas et des cyclistes.	- 73 -
FIGURE 19 Affiche de la campagne menée par l'Assurance Maladie pour la sensibilisation à la lombalgie.	- 75 -
FIGURE 20 Effets de la pratique d'exercices physiques sur les facteurs physique, psychologique, les capacités fonctionnelles et la qualité de vie.	- 76 -

FIGURE 21 Fréquence des prescriptions médicales et évolution du statut professionnel à 30 mois chez des lombalgiques chroniques ayant adhéré à une pratique d'exercices régulière et chez des lombalgiques chroniques contrôles.	- 77 -
FIGURE 22 Résumé du modèle biopsychosocial pour la prise en charge des lombalgiques chroniques.	- 80 -
FIGURE 23 Plan expérimental des études.	- 94 -
FIGURE 24 Protocole d'exercices isocinétiques en mode arthromoteur.	- 98 -
FIGURE 25 Feedback visuel au cours d'une extension à 80 N·m et figure obtenue après un exercice à 70%max représentant l'ensemble des extensions effectuées.	- 99 -
FIGURE 26 Optodes positionnées au regard des muscles paravertébraux, composées d'un récepteur et de trois émetteurs de lumière proche infrarouge.	- 101 -
FIGURE 27 Participant installé sur un dynamomètre isocinétique, équipé de l'analyseur d'échanges gazeux pulmonaires.	- 103 -
FIGURE 28 Placements des électrodes EMG sur les muscles abdominaux, paravertébraux, ischio-jambiers et gastrocnémiens.	- 105 -
FIGURE 29 Méthode d'analyse statistique.	- 109 -
FIGURE 30 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 1.	- 116 -
FIGURE 31 Travail total développé au cours de chaque exercice de 5 minutes.	- 117 -
FIGURE 32 Sensations de douleur dans le bas du dos et à l'arrière des cuisses à la fin des exercices.	- 117 -
FIGURE 33 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb évalués au regard des muscles paravertébraux du côté gauche et du côté droit, au cours de l'exercice à 80 N·m.	- 117 -
FIGURE 34 Évolution du <i>mean power frequency</i> et du <i>root mean square</i> mesurés au niveau des muscles paravertébraux, biceps fémoraux, gastrocnémiens et du grand droit au cours de l'exercice à 80 N·m.	- 118 -
FIGURE 35 Corrélations entre ΔHHb et RMS mesurés au regard des muscles paravertébraux, biceps fémoraux, gastrocnémiens et du muscle grand droit au cours de l'exercice à 80 N·m.	- 119 -
FIGURE 36 Évolution du <i>mean power frequency</i> et du <i>root mean square</i> , mesurés au niveau muscles paravertébraux, des biceps fémoraux, des gastrocnémiens et du grand droit au cours de l'exercice à 70% max.	- 120 -
FIGURE 37 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 2.	- 126 -
FIGURE 38 Moment de force maximal développé au cours d'une extension du tronc en mode isocinétique classique et en mode arthromoteur chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs .	- 127 -
FIGURE 39 Travail total développé au cours de chaque exercice chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs.	- 127 -

FIGURE 40 Indice d'efficacité mécanique au cours de chaque exercice chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs.	- 129 -
FIGURE 41 Cinétique de $\dot{V}O_2$ obtenue au cours de l'exercice à 80 N·m et à 70% max chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs.	- 129 -
FIGURE 42 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb au cours de l'exercice à 80 N·m et à 70% max chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs .	- 130 -
Figure 43 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 3.	- 136 -
FIGURE 44 Moment de force développé sur une extension du tronc maximale et temps de maintien au test de Sorensen chez les lombalgiques chroniques et les sujets contrôles.	- 137 -
FIGURE 45 Scores obtenus au questionnaire SF-36 et au questionnaire de Baecke chez les lombalgiques chroniques et les sujets contrôles.	- 137 -
FIGURE 46 Douleurs ressenties dans le bas du dos chez les lombalgiques chroniques et les sujets contrôles, avant et après l'exercice, à 80 N·m et à 70% max.	- 138 -
FIGURE 47 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb chez les lombalgiques chroniques et chez les sujets contrôles au cours de l'exercice à 80 N·m et à 70% max.	- 140 -
FIGURE 48 Plan de l'étude 4.	- 145 -
FIGURE 49 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 4.	- 146 -
FIGURE 50 Moment de force maximal développé par les muscles extenseurs et tronc et temps de maintien au test de Sorensen au début et à la fin du programme.	- 147 -
FIGURE 51 Douleurs ressenties dans le bas du dos au début et à la fin du programme, avant et après l'exercice sous-maximal.	- 148 -
FIGURE 52 Perception de l'effort en fin d'exercice au début au début et à la fin du programme.	- 148 -
FIGURE 53 Cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ au cours de l'exercice sous-maximal, au début et à la fin du programme.	- 149 -
FIGURE 54 $\dot{V}O_2$, fréquence cardiaque, débit ventilatoire, efficacité mécanique et augmentation de la lactatémie à l'exercice au début et à la fin du programme.	- 149 -
FIGURE 55 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb au cours de l'exercice sous-maximal au début , à la fin et 3 mois après le programme de restauration fonctionnelle du rachis.	- 150 -
FIGURE 56 Scores obtenus aux questionnaires de Baecke et SF-36 avant et 3 mois après le programme.	- 151 -
FIGURE 57 Scores obtenus aux questionnaires FABQ-Pro et Baecke-Pro chez les patients ayant repris leur activité professionnelle et ceux n'ayant pas repris leur activité professionnelle lors de la visite de suivi à 3 mois.	- 153 -

INDEX DES TABLEAUX

TABLEAU 1 Tendances de courbes relatives au volume sanguin et à l'oxygénation des muscles paravertébraux, observées au cours de divers exercices.	- 36 -
TABLEAU 2 Facteurs de risque associés à la chronicisation de la lombalgie.	- 44 -
TABLEAU 3 Évaluation de $\dot{V}O_{2max}$ de sujets lombalgiques chroniques.	- 54 -
TABLEAU 4 Classification des niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ établie par Shvartz & Reibold (1990).	- 55 -
TABLEAU 5 Études portant sur l'oxygénation des muscles paravertébraux chez les sujets lombalgiques chroniques.	- 61 -
TABLEAU 6 Effets d'une période de restauration fonctionnelle du rachis chez des patients lombalgiques chroniques.	- 82 -
TABLEAU 7 Résumé des tests et outils de mesures utilisés dans chaque étude.	- 96 -
TABLEAU 8 Ensemble des questionnaires distribués aux lombalgiques à P1, P2 et/ou P3.	- 108 -
TABLEAU 9 Caractéristiques des participants de l'étude 1.	- 116 -
TABLEAU 10 Caractéristiques des participants de l'étude 2.	- 125 -
TABLEAU 11 Réponses cardiorespiratoires et perception de l'effort mesurées à la fin de chaque exercice chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs.	- 128 -
TABLEAU 12 Caractéristiques des participants de l'étude 3.	- 135 -
TABLEAU 13 Travail total, réponses cardiorespiratoires, efficacité mécanique et perception de l'effort des lombalgiques chroniques et des sujets contrôles au cours de chaque exercice.	- 139 -
TABLEAU 14 Caractéristiques des participants de l'étude 4.	- 144 -
TABLEAU 15 Évolution des facteurs psychosociaux entre le début et à la fin du programme.	- 147 -
TABLEAU 16 Évolution des facteurs psychosociaux, physiques, et des réponses à l'exercice sous-maximal entre la fin du programme et 3 mois après le retour à domicile.	- 152 -

INDEX DES EQUATIONS

ÉQUATION 1 $\dot{V}O_2 = \dot{Q}_s \times (CaO_2 - CvO_2)$	- 26 -
ÉQUATION 2 $\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(0)} + A(1 - e^{-(t-TD)/\tau})$	- 29 -
ÉQUATION 3 Dépense énergétique ($J \cdot s^{-1}$) = $[(3.869 \times \dot{V}O_2) + (1.195 \times \dot{V}CO_2)] \times (4.186/60) \times 1000$	- 103 -
ÉQUATION 4 Efficacité mécanique (%) = $(W_{tot}/300) / DE_{exercice} \times 100$	- 103 -

LISTE DES ABREVIATIONS

τ	<i>Constante de temps</i>	NIRS	<i>Spectroscopie proche infrarouge</i>
ANOVA	<i>Analyse de variance</i>	O ₂	<i>Oxygène</i>
AP	<i>Activité physique</i>	OXY	<i>Indice d'oxygénation musculaire</i>
APS	<i>Activités physiques et sportives</i>	P1	<i>Période 1</i>
ATP	<i>Adénosine triphosphate</i>	P2	<i>Période 2</i>
BF	<i>Muscle biceps fémoral</i>	P3	<i>Période 3</i>
CaO ₂ -	<i>Différence du contenu artério</i>	Pro	<i>Professionnel</i>
CvO ₂	<i>veineux en oxygène</i>	PV	<i>Muscles paravertébraux</i>
CO ₂	<i>Dioxyde de carbone</i>	Q _s	<i>Débit sanguin</i>
DE	<i>Dépense énergétique</i>	RMS	<i>Root mean square</i>
EIFEL	<i>Échelle d'incapacité fonctionnelle pour l'évaluation de la lombalgie</i>	RPE	<i>Perception de l'effort</i>
EMG	<i>Électromyographie</i>	SF-36	<i>Questionnaire Short-Form 36</i>
ES	<i>Erreur standard</i>	t	<i>Temps</i>
ET	<i>Écart type</i>	TD	<i>Délai de transit de l'O₂</i>
EVA	<i>Échelle visuelle analogique</i>	THb	<i>Hémoglobine total</i>
FABQ	<i>Questionnaire Fear-Avoidance Beliefs</i>	THb ₍₀₎	<i>THb au repos</i>
FC	<i>Fréquence cardiaque</i>	TOI	<i>Indice d'oxygénation tissulaire</i>
Fr	<i>Fréquence respiratoire</i>	TRM	<i>Temps de réponse moyen</i>
G	<i>Muscle gastrocnémien</i>	UA	<i>Unité arbitraire</i>
GD	<i>Muscle grand droit</i>	ṠCO ₂	<i>Dioxyde de carbone rejeté</i>
H ⁺	<i>Ion hydrogène</i>	ṠE	<i>Débit ventilatoire</i>
H ₂ O	<i>Molécule d'eau</i>	ṠO ₂	<i>Consommation en oxygène</i>
HAD	<i>Hospital Anxiety Depression</i>	ṠO ₂₍₀₎	<i>Consommation en oxygène au repos</i>
HAS	<i>Haute Autorité de Santé</i>	ṠO _{2max}	<i>Consommation maximale en oxygène</i>
Hb	<i>Hémoglobine</i>	V _t	<i>Volume courant</i>
HbO ₂	<i>Oxyhémoglobine</i>	W _{tot}	<i>Travail total</i>
HbO ₂₍₀₎	<i>HbO₂ au repos</i>	ΔHbO ₂	<i>HbO₂ normalisé par rapport aux valeurs de repos</i>
HHb	<i>Désoxyhémoglobine</i>	ΔHHb	<i>HHb normalisé par rapport aux valeurs de repos</i>
HHb ₍₀₎	<i>HHb au repos</i>	ΔTHb	<i>THb normalisé par rapport aux valeurs de repos</i>
L	<i>Muscle lombaire</i>	ΔṠO ₂	<i>ṠO₂ normalisé par rapport aux valeurs de repos</i>
Mb	<i>Myoglobine</i>		
MPF	<i>Mean power frequency</i>		
MR	<i>Mesures répétées</i>		

RESUME

Introduction : Les muscles paravertébraux interviennent en permanence dans les tâches de la vie quotidienne pour la stabilisation et la mobilisation du rachis. Cela nécessite la contribution du métabolisme aérobie musculaire. La lombalgie chronique est caractérisée par un haut niveau de fatigabilité et des sensations de douleur au regard des muscles paravertébraux, qui pourraient être en partie attribués à l'altération des réponses du métabolisme aérobie musculaire, tandis que la pratique d'activités physiques et sportives (APS) pourrait améliorer ces réponses

Objectif : L'objectif général était de déterminer la spécificité des réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux chez des patients lombalgiques chroniques, avant et après un programme de restauration fonctionnelle, et chez différents athlètes en bonne santé.

Méthode : Quatre études ont été menées. Chaque participant a effectué des exercices isocinétiques sous-maximaux d'extension du tronc pendant cinq minutes, afin d'évaluer les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux à l'exercice. Des sujets lombalgiques chroniques ont été appariés et comparés à des sujets sains, puis suivis au cours d'un programme de restauration fonctionnelle, dont la principale composante était l'exercice physique. Des sujets jeunes et en bonne santé, sportifs et non sportifs, ont été comparés entre eux.

Résultats/Conclusion : Chez les lombalgiques chroniques, le programme de restauration fonctionnel a permis une accélération des cinétiques de $\dot{V}O_2$, une augmentation de l'oxygénation musculaire, et une augmentation de l'efficacité mécanique à l'exercice. Chez les jeunes sportifs, les réponses aérobies étaient aussi améliorées, et la modification de ces réponses était dépendante des modalités d'entraînement. Ces résultats suggèrent que la pratique d'APS améliore la contribution du métabolisme aérobie au cours d'un exercice prolongé d'extension du tronc, au regard des muscles paravertébraux. Il n'y avait pas de différence entre les réponses métaboliques et hémodynamiques à l'exercice des lombalgiques chroniques, et celles des sujets sains, malgré un faible niveau de force maximale, et un haut niveau de fatigabilité musculaire à l'exercice chez les lombalgiques chroniques. Bien que les résultats préliminaires ne témoignent pas d'une altération des réponses chez les lombalgiques chroniques, nos travaux suggèrent que la pratique d'activités physiques pourrait diminuer le niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux, et ainsi limiter les risques de blessure et de contre-performance, en améliorant les réponses aérobies à l'exercice

Mots clés : *Muscles paravertébraux, métabolisme aérobie musculaire, extension du tronc, lombalgie chronique, programme de restauration fonctionnelle, activités physiques*

ABSTRACT

Introduction: Paraspinal muscles are required continuously during daily tasks for trunk stabilization and mobilization. For this, aerobic metabolism muscle contribution is required. Chronic low back pain is characterized by a high level of fatigability and pain sensations in regard to paraspinal muscles. These symptoms may be attributed to an alteration in aerobic metabolism responses. Conversely, practising physical and sports activities (PSA) could improve these responses.

Objective: The main objective was to determine the specificities in aerobic metabolism responses in regard to paraspinal muscles, in chronic low back pain patients following a functional restoration program and in healthy athletes.

Method: Four studies have been conducted. Participants performed submaximal trunk extension exercises on an isokinetic dynamometer for five minutes, to assess paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercises. Chronic low back pain patients were paired with and compared to healthy individuals and followed during a functional restoration program, in which physical exercise was the main component. Also, healthy young individuals, with and without sport specialization, were compared with each other.

Results/Conclusion: In chronic low back pain patients, the functional restoration program allows an acceleration in $\dot{V}O_2$, kinetics, an increase in paraspinal muscle oxygenation, and an increase in mechanical efficiency to exercise. In young athletes, the aerobic responses were also improved, and the changes in responses depended on the training modalities. Practicing SPA enhances the aerobic metabolism contribution during prolonged trunk extension exercise, in regard to paraspinal muscles. There was no difference in aerobic metabolism responses between the chronic low back pain patients and the healthy individuals, despite weak levels of maximal strength and high levels of muscle fatigability when exercising (for the chronic low back pain patients). Although the preliminary results did not attest to an alteration in aerobic responses in chronic low back pain patients, our results suggest that practising physical activities could limit paraspinal muscle fatigability, which could be a way to prevent injury and disappointing performances, by improving aerobic metabolism responses to exercise.

Key words: Paraspinal muscles, muscle aerobic responses, trunk extension, low back pain, restoration program, physical activities

INTRODUCTION

La lombalgie est considérée aujourd'hui comme le mal du siècle, à cause de sa grande prévalence, des incapacités qu'elle engendre dans la population et de ses répercussions socioéconomiques (Hoy et al. 2014). En plus des douleurs résidant dans la partie basse du dos, elle est associée à des limitations physiques, psychologiques et fonctionnelles. Un haut niveau de fatigabilité musculaire à l'exercice est notamment associé à ces limitations, surtout lorsque les muscles paravertébraux sont sollicités (Kankaanpää et al. 1998b). Aujourd'hui, il réside un réel enjeu à travers sa prise en charge, mais cette pathologie reste très difficile à soigner à cause de son aspect multifactoriel et de son étiologie souvent incertaine. Face aux difficultés pour abréger les souffrances lombaires, on assiste trop souvent à la chronicisation de la maladie. Dans ces cas, les symptômes s'auto-entretiennent et s'exacerbent. La prise en charge de la lombalgie chronique est alors d'autant plus complexe, et les enjeux qui y sont associés s'intensifient. Les opérations chirurgicales ne sont pas privilégiées pour le traitement de la lombalgie, puisqu'elles sont coûteuses et risquées, surtout par rapport aux thérapies dites conservatives.

Le but de ces thérapies est de diminuer les symptômes associés à la lombalgie chronique et de permettre la réhabilitation des patients. C'est notamment le cas des programmes de restauration fonctionnelle du rachis, dont l'activité physique est la principale composante. Ces programmes ont aujourd'hui largement fait leurs preuves pour l'amélioration des fonctions physiques, psychologiques et fonctionnelles des patients (Kamper et al. 2015). Ces programmes consistent en une prise en charge pluridisciplinaire, dans laquelle le patient n'est pas seulement spectateur mais également acteur face à sa maladie. Cela dit, aucun type de prise en charge ne représente aujourd'hui une solution miracle pour le soin de la lombalgie chronique. Même si les programmes de restauration fonctionnelle apportent de nombreux bénéfices aux patients, il existe aujourd'hui de nombreuses incertitudes quant aux maintiens des effets à long terme. D'autre part, les facteurs favorisant ou non la réhabilitation à long terme restent obscurs.

Les réponses du métabolisme aérobie musculaire ont été jusqu'à aujourd'hui très peu étudiées chez les lombalgiques chroniques inclus dans un processus de restauration fonctionnelle. Pourtant, au vu du haut niveau de fatigabilité musculaire, des hypothèses suggèrent que cette pathologie serait associée à une altération métabolique des muscles paravertébraux. Un tel phénomène pourrait être associé à des réponses hémodynamiques ou métaboliques inadéquates à l'exercice. En conséquence, cela pourrait diminuer les capacités physiques des individus même dans les tâches de la vie quotidienne, puisque ces muscles sont sollicités en quasi-permanence dans les activités usuelles. Ainsi, une mauvaise adaptation des réponses à l'exercice pourrait entretenir les sensations de douleur et augmenter la fatigabilité musculaire à l'effort. D'autre part, les exercices physiques, qui composent une grande partie des programmes de restauration fonctionnelle, pourraient permettre de modifier les réponses métaboliques à l'exercice, puisque la pratique chronique d'exercice peut améliorer les réponses hémodynamiques et/ou métaboliques musculaires. Cela a largement été montré au regard du muscle quadriceps par exemple, tandis que les données relatives aux muscles paravertébraux sont très limitées. La spécificité des réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux chez les lombalgiques chroniques et la modification des réponses après une période de restauration fonctionnelle du rachis méritent d'être davantage étudiés.

Outre l'absence de consensus face aux caractéristiques des réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux chez les patients lombalgiques chroniques, il réside aujourd'hui un manque d'informations relatives aux réponses et aux adaptations propres aux muscles paravertébraux chez les sujets indemnes de toute pathologie. Bien qu'ils aient largement été étudiés sous un angle anatomique et fonctionnel, les réponses physiologiques qui caractérisent ces muscles sont méconnues. Pourtant, ces muscles occupent un rôle essentiel dans notre quotidien, pour la protection, la stabilisation et la mobilisation du rachis. Face à cela, notre volonté était d'étudier les spécificités physiologiques de ce groupe musculaire singulier, très peu décrites dans la littérature.

La pratique régulière d'activités sportives est associée à une modification des réponses du métabolisme musculaire et de l'hémodynamisme à l'exercice, dépendante des modalités d'entraînement. Ainsi, certaines pratiques sportives pourraient avoir un effet sur les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux. L'étude de ces phénomènes pourrait nous permettre de mieux comprendre quel est le degré d'adaptabilité de ces muscles, et de quelles manières il serait possible d'optimiser les réponses aérobies à l'exercice. Une meilleure connaissance de l'adaptabilité des muscles paravertébraux pourrait nous permettre de mieux comprendre ce que nous pourrions attendre d'une période de restauration fonctionnelle du rachis à court et moyen terme chez les sujets souffrant de lombalgie chronique. La mise en lumière de ces différents éléments nous permettra de répondre à l'objectif général de cette thèse, qui réside dans la détermination des réponses hémodynamiques et métaboliques spécifiques aux muscles paravertébraux.

Ainsi, dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons étudié les réponses hémodynamiques et métaboliques des muscles paravertébraux, spécifiques à différentes populations : les sportifs, et les patients lombalgiques ; afin de déterminer les effets de la pathologie et de la pratique d'exercices physiques.

PARTIE 1

REVUE DE LA LITTERATURE

CHAPITRE 1

LE RACHIS ET LE METABOLISME AEROBIE *RAPPELS ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES*

I) L'anatomie du rachis et ses composantes

Le rachis est une structure osseuse qui s'étend de la base du crâne jusqu'au bassin, et qui remplit plusieurs fonctions essentielles. Il a non seulement un rôle mécanique pour la stabilisation et la mobilisation du tronc, mais également un rôle de protection pour la moelle épinière et les racines nerveuses (Panjabi 1992). Le rachis peut assurer ces fonctions grâce à différentes composantes.

1. Les vertèbres

Le rachis est composé de sept vertèbres cervicales, douze vertèbres dorsales, cinq vertèbres lombaires, le sacrum et le coccyx (Carey 1927; Netter 2011) (*Figure 1*). Sur la partie antérieure de la vertèbre, on trouve le corps vertébral, un petit os cylindrique, dont les faces supérieures et inférieures sont appelées les plateaux vertébraux. Sur la partie postérieure de la vertèbre on trouve l'arc vertébral composé de différentes parties : les pédicules forment les parois ventrales de part et d'autre du foramen. Ils sont prolongés par les lames, afin de fermer dorsalement le foramen. Ce dernier est un trou vertébral dans lequel cheminent les fibres nerveuses motrices et sensibles qui forment la moelle épinière. La moelle épinière chemine jusqu'à la deuxième vertèbre lombaire avant de former la « queue de cheval » qui est en fait un prolongement de la moelle épinière, nommée ainsi pour son aspect.

Sur chaque arc vertébral, on dénombre plusieurs apophyses qui servent de points d'insertion aux muscles, aux ligaments et aux tendons. L'apophyse épineuse naît de la jonction de deux lames. C'est cette dernière qui forme la partie osseuse parfois visible à l'œil nu et facilement palpable chez les êtres humains. Les apophyses transverses naissent des jonctions entre les lames et les pédicules, elles se projettent latéralement. Les apophyses articulaires

inférieures et supérieures se situent également à la jonction entre les lames et les pédicules mais elles se projettent plus verticalement que les apophyses transverses. L'apophyse articulaire inférieure d'une vertèbre rejoint l'apophyse articulaire supérieure de la vertèbre sous-jacente et forme l'articulation inter-apophysaire (François et al. 1985), elles permettent ainsi d'articuler les vertèbres entre-elles.

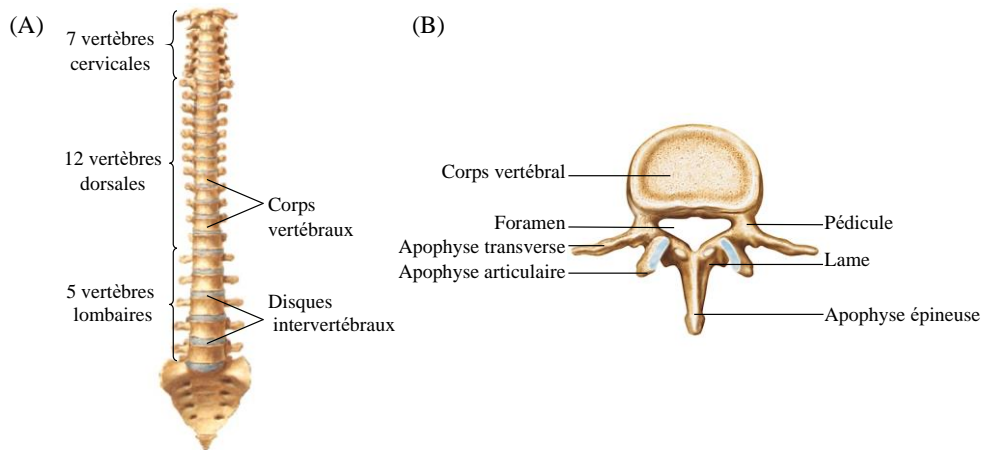


Figure 1 (A) Anatomie du rachis en vue ventrale et (B) d'une vertèbre lombaire en vue supérieure. (Figure adaptée d'après Netter 2011).

2. Le disque intervertébral

Chaque vertèbre est séparée de celle qui la précède et de celle qui la succède par un disque intervertébral, situé sur le plateau vertébral. Chaque disque est composé de deux structures. Le noyau au centre, a un rôle de protection pour les vertèbres, il amortit les chocs. Il agit tel un coussin, et est capable de reprendre sa forme initiale suite à une déformation due à une charge excessive (Virgin 1951). Ainsi, son apparence évolue au cours de la journée. Il s'aplatit sous l'effet de la gravité, puis reprend sa forme initiale en position de décubitus prolongé. La substance du noyau est gélatineuse, d'où le nom de *nucleus pulposus*. La seconde structure est un anneau fibro-cartilagineux qui assure la stabilité du rachis, l'*annulus fibrosus*.

3. Les ligaments rachidiens

Les ligaments rachidiens relient les structures osseuses les unes aux autres. Leur rôle est de limiter l'amplitude des mouvements, en agissant comme une résistance contre une flexion, une extension, une rotation ou une inclinaison latérale trop importante du tronc, remplissant alors un rôle de protection quand l'amplitude du mouvement devient trop importante (Panjabi 1992). Les ligaments longitudinaux antérieurs et postérieurs relient les vertèbres de part et

d'autre du corps vertébral. Le ligament jaune s'étend également de manière longitudinale, mais il se fixe au niveau des lames, à l'arrière du foramen. C'est pourquoi on le nomme aussi le ligament interlaminaire. Les ligaments interépineux s'étendent obliquement entre deux vertèbres adjacentes au niveau des apophyses épineuses. Le ligament supraépineux relie les vertèbres par les faces postérieures des apophyses épineuses. Les ligaments intertransversaires unissent quant à eux les apophyses transverses entre elles (*Figure 2*). Les ligaments iliolumbaires se situent de part et d'autre du rachis et relient les apophyses transverses de la cinquième vertèbre lombaire à l'ilium.

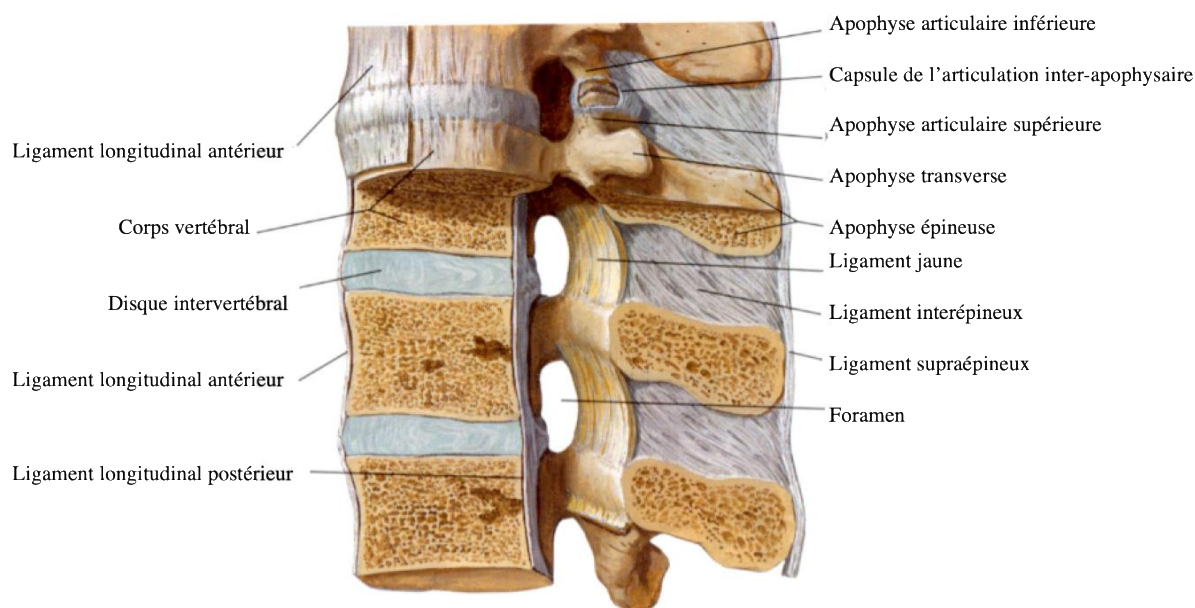


Figure 2 Ligaments et vertèbres du rachis lombaire en vue latérale. (Figure adaptée d'après Netter 2011).

4. Les muscles impliqués pour la mobilité et la stabilité du rachis

4.1 *Les muscles paravertébraux*

Les muscles du rachis sont recouverts d'une enveloppe qu'on appelle le fascia thoracolumbaire. Sur le plan postérieur, se situent les muscles paravertébraux disposés en plusieurs couches. Dans la couche intermédiaire, les muscles iliocostal (*iliocostalis*), long dorsal (*longissimus*) et épineux (*spinalis*) participent à l'extension du tronc, c'est pourquoi ils forment le groupe des muscles érecteurs du rachis (*erector spinae*) (*Figure 3*). Les muscles érecteurs du rachis prennent leur origine au niveau de la crête iliaque, du sacrum, et des apophyses épineuses lombaires et sacrales. L'iliocostal est le muscle le plus latéral. Il s'insère au niveau des côtes et des apophyses transverses pour la partie cervicale. Le muscle long dorsal s'insère sur les

apophyses transverses des vertèbres thoraciques, cervicales, et au niveau de l'os temporal (au-dessus des vertèbres cervicales). Le muscle épineux s'insère sur les apophyses épineuses de la région thoracique inférieure, de la région cervicale supérieure et sur le crâne (Moore et al. 2017).

Dans la couche profonde, le muscle transversaire épineux s'étend en plusieurs faisceaux qui prennent leur origine au niveau du sacrum, des crêtes iliaques, des apophyses transverses, et des apophyses articulaires. Ils s'insèrent sur les apophyses épineuses. Les nombreux faisceaux qui le composent lui confèrent l'autre nom de muscle multifide (*multifidus*). Le muscle transversaire épineux participe à la mobilité du tronc, et joue également un rôle pour la stabilisation et la rotation des vertèbres.

Les muscles interépineux et intertransversaires sont quant à eux des muscles intersegmentaires, ils relient les vertèbres entre elles. Ils s'étendent respectivement entre les apophyses épineuses et les apophyses transverses. La haute concentration de fuseaux neuromusculaires qui les caractérise suggère qu'ils auraient un rôle proprioceptif important. Ils transmettraient ainsi des informations relatives à la position du rachis aux autres muscles paravertébraux qui agiront pour sa stabilisation ou sa mobilisation (Gilchrist et al. 2003).

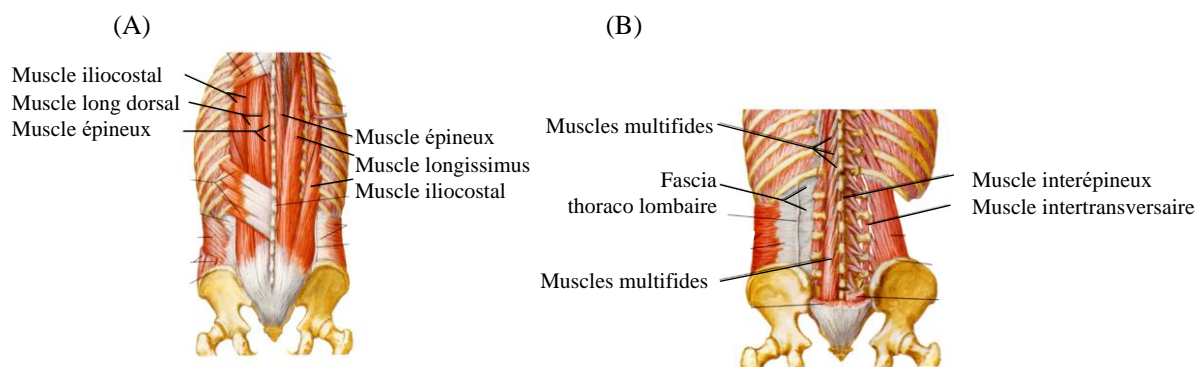


Figure 3 Muscles du rachis (A) en couche intermédiaire (muscles érecteurs du rachis) (B) et en couche profonde. (Figure adaptée d'après Netter 2011).

Les muscles carrés des lombes et psoas se situent dans la face antérieure du fascia-thoraco lombaire. Ils s'attachent aux vertèbres lombaires d'une part, et d'autre part aux côtes et au petit trochanter respectivement. Ils participent également aux déplacements du tronc, dont l'inclinaison et la rotation.

Les muscles paravertébraux sont les principaux muscles impliqués dans l'extension du tronc lorsqu'ils se contractent de manière bilatérale, tandis que la contraction unilatérale de ces muscles permet l'inclinaison du tronc. Ils sont également sollicités pour la stabilité du rachis (Cholewicki et al. 1997). Lors du déplacement volontaire d'un membre, on assiste même à une contraction anticipée des muscles paravertébraux, afin de prévenir le déséquilibre lié au changement de position (Bouisset & Zattara 1981).

Au vu des sollicitations musculaires perpétuelles pour la stabilité et la mobilité rachidienne, les muscles paravertébraux sont essentiellement composés de fibres de type lentes, c'est-à-dire de fibres avec un haut potentiel oxydatif, de 54 à 73% en fonction des études (Demoulin et al. 2007). L'écart entre les études montre qu'il existe une grande variabilité interindividuelle quant à la typologie des fibres, notamment en fonction du sexe, et de l'âge de l'individu (Mannion et al. 1997a, 2000). D'autre part, certaines pathologies entraînent une altération de la typologie musculaire. Dans le cas de sujets souffrant de lombalgie chronique, Mannion et collaborateurs ont rapporté une diminution de la proportion de fibres lentes par rapport aux fibres rapides (Mannion et al. 1997b).

4.2 Les muscles abdominaux

La stabilité du rachis nécessite une action synergique des muscles postérieurs du tronc, et de leurs antagonistes pour corriger les défauts de posture et rétablir l'équilibre après une perturbation. Ainsi, les autres muscles impliqués dans la stabilité et la mobilité rachidienne sont les muscles de la face antérieure du tronc : c'est-à-dire les muscles abdominaux (Cholewicki et al. 1997). Sur la paroi abdominale, se situent les muscles obliques de l'abdomen, le muscle transverse de l'abdomen (muscle profond), et le muscle grand droit (muscle superficiel). Lors d'une perturbation posturale, qu'elle soit anticipée ou non, leur recrutement augmente avant celui des muscles paravertébraux. En effet, le délai des réponses contractiles serait de 24 ms pour le muscle transverse de l'abdomen, et de 65 ms pour les muscles érecteurs du rachis lors d'une perturbation inopinée, tandis que les adaptations posturales apparaissent avant même que la perturbation soit provoquée lorsque celle-ci est anticipée (Cresswell et al. 1994). L'implication des muscles augmente avec l'intensité et/ou la durée de la contraction.

Il a déjà été montré que le niveau d'activation des muscles de la face antérieure du tronc, lors d'une extension du tronc était liée à une augmentation de la pression intra-abdominale. Cette pression serait encore plus importante que celle provoquée lors d'une flexion du tronc, phase où pourtant les muscles abdominaux agissent en tant qu'agonistes. En plus de participer

à la stabilité rachidienne (Lee et al. 2006 ; Cresswell et al. 1994), la pression intra-abdominale permettrait une décharge des pressions qui agissent sur le rachis, diminuant ainsi les charges compressives qui s'exercent au niveau du disque intervertébral (Cresswell & Thorstensson 1994). Ainsi, les muscles du tronc agissent en synergie pour la stabilité et la mobilité du rachis (Granata & Wilson 2001; Allison & Henry 2001).

4.3 Les autres muscles sollicités par le rachis

Les muscles de la loge postérieure des membres inférieurs sont également sollicités lors de la mobilisation du rachis, pour compléter le recrutement des muscles érecteurs du rachis. Les deux principaux co-agonistes participant à l'extension du tronc avec les muscles paravertébraux sont les muscles grands glutéaux, et les muscles ischio-jambiers, composés de trois chefs : le semi-tendineux, le semi-membraneux et le biceps fémoral (*Figure 4*). Ils participent en effet à l'extension du tronc à travers l'extension de la hanche, grâce à un transfert d'énergie du bas du corps vers le rachis en position debout (Leinonen et al. 2000; Gilchrist et al. 2003). Ainsi, lorsqu'un de ces muscles est lésé, on assiste souvent à un déficit musculaire généralisé à l'ensemble de la chaîne musculaire postérieure (Kankaanpää et al. 1998b; Leinonen et al. 2000).

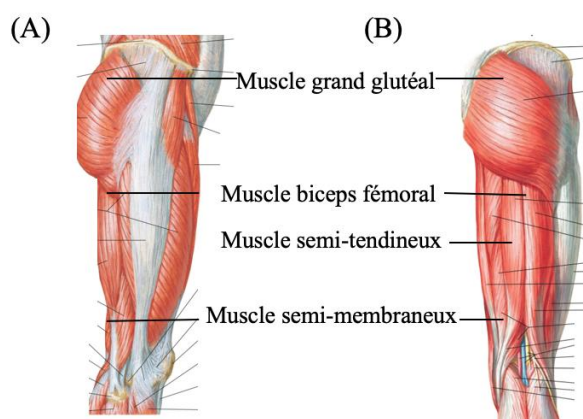


Figure 4 Muscles grands glutéaux et ischio-jambiers (biceps fémoral, semi-tendineux et semi-membraneux) (A) en vue latérale et (B) en vue postérieure. (Figure adaptée d'après Netter 2011).

Lorsqu'une fatigue musculaire s'installe dans les muscles paravertébraux lors d'une tâche d'extension du tronc, le prolongement de l'exercice a déjà été associé à une augmentation du niveau d'activation de ces muscles co-agonistes : les muscles biceps fémoraux et grands glutéaux (Clark et al. 2003) (*Figure 5*). L'augmentation de cette activation est attribuée à l'augmentation progressive de l'implication des muscles de la hanche, au fur et à mesure de l'exercice. En parallèle, les mouvements du rachis diminuent, et par conséquent le niveau d'activation des muscles paravertébraux baisse. Cette synergie permet de limiter l'implication du tronc lors de tâches qui pourraient provoquer des lésions sur les structures musculotendineuses, ligamenteuses ou osseuses du rachis.

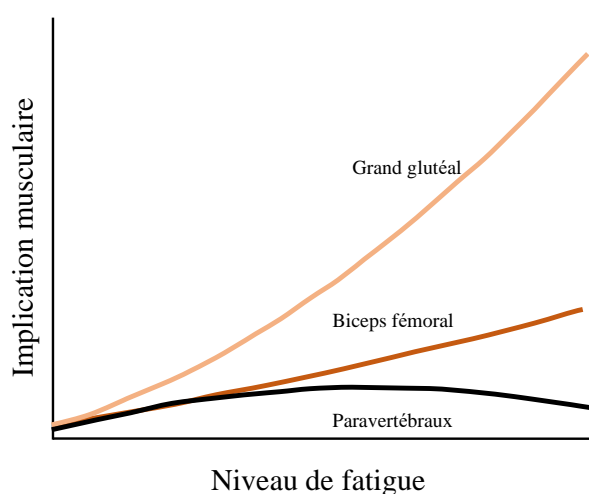


Figure 5 Représentation de l'implication des muscles paravertébraux, biceps fémoraux et grands glutéaux au cours d'un exercice prolongé d'extension du tronc. (Figure adaptée d'après Clark et al. 2003).

L'implication musculaire pour la stabilisation et la mobilisation du rachis dans les activités quotidiennes est quasi-permanente. C'est pourquoi, il est nécessaire d'avoir un bon niveau d'endurance des muscles paravertébraux, pour que ceux-là puissent remplir leurs fonctions.

Ce niveau d'endurance sera étroitement lié à la qualité des réponses hémodynamiques et métaboliques aérobies puisque si la contraction musculaire est prolongée, l'oxygène (O_2) sera nécessaire pour fournir de l'énergie. Nous verrons dans les prochains paragraphes quels sont les mécanismes physiologiques impliqués, et quelles réponses peuvent être analysées pour apprécier la qualité des réponses aérobies.

II) La contribution du métabolisme aérobie au cours d'un exercice musculaire

1. Le rôle de l'oxygène

La contraction musculaire nécessite une augmentation de la formation de molécules d'adénosine triphosphate (ATP) pour fournir de l'énergie. Lorsqu'une contraction musculaire est prolongée, l'oxygène permet l'oxydation de l'acétylcoenzyme A dans la matrice mitochondriale, donnant lieu à la formation d'ATP, de CO₂ et de deux molécules (NADH et FADH₂). Ce cycle a été découvert par Hans Adolf Krebs en 1940. L'oxydation des molécules dans la chaîne de transport des électrons aboutira ensuite à la formation de dioxyde de carbone (CO₂), d'eau (H₂O) et de molécules d'ATP. Il s'agit du processus de phosphorylation oxydative (Figure 6).

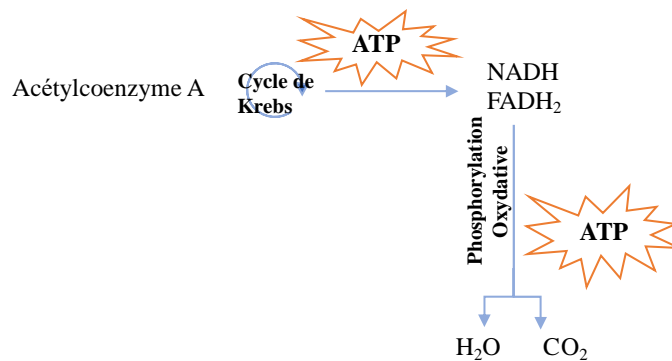


Figure 6 Principales étapes pour la formation de molécules d'adénosine triphosphate par la filière aérobie.

2. Transport et utilisation de l'oxygène par le muscle : l'oxygénation musculaire

L'O₂ nécessaire à la contribution du métabolisme aérobie provient directement de l'air ambiant. Après avoir traversé l'appareil respiratoire, l'O₂ rejoint la circulation sanguine grâce aux gradients de pression (Aguilaniu & Péronnet 2012), où on le trouvera à 98%, combiné avec de l'hémoglobine (Hb) formant ainsi l'oxyhémoglobine (HbO₂). Cette liaison n'est pas irréversible. Lors d'un exercice musculaire, l'Hb et l'O₂ se dissocient pour permettre l'oxydation des substrats dans les muscles actifs, augmentant alors la quantité d'Hb désoxygénés (HHb) dans le réseau micro-vasculaire. Ainsi, l'oxygénation musculaire reflète l'équilibre entre apport et utilisation de l'O₂ pour répondre aux besoins musculaires

La quantité d'O₂ stockée directement dans l'organisme est si faible qu'on considère, à l'exercice, que l'augmentation de la consommation pulmonaire en oxygène ($\dot{V}O_2$) reflète directement l'utilisation de l'O₂ par les territoires actifs.

3. La consommation maximale en oxygène

La consommation maximale en oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) représente le plus grand volume d'oxygène pouvant être consommé par unité de temps au cours d'un exercice, par un individu. Selon l'équation de Fick (*Équation 1*), $\dot{V}O_{2max}$ est dépendant du débit sanguin (\dot{Q}_s) et de la différence artério-veineuse en oxygène (CaO_2-CvO_2), c'est-à-dire des adaptations cardiorespiratoires et vasculaires à l'exercice, et de la capacité oxydative musculaire.

$$\text{Équation 1 } \dot{V}O_2 = \dot{Q}_s \times (CaO_2 - CvO_2)$$

$\dot{V}O_{2max}$ est atteint lors de tâches globales, sollicitant de grandes masses musculaires (par exemple, pendant un exercice incrémental maximal de pédalage ou de course). $\dot{V}O_{2max}$ est alors un excellent indicateur de l'aptitude aérobie. En revanche, il ne peut pas être considéré comme un bon reflet de l'aptitude ou de la capacité aérobie des muscles paravertébraux, qui sont dans ces contextes peu sollicités.

4. Le coût en oxygène au cours d'un exercice sous-maximal

La mesure des échanges gazeux pulmonaires fournit des informations sur le travail métabolique induit par l'exercice, notamment par la méthode de calorimétrie indirecte qui estime la dépense énergétique des individus en fonction de $\dot{V}O_2$ et du rejet de CO₂ ($\dot{V}CO_2$) (Lam & Ravussin 2016). Il est possible de normaliser cette dépense énergétique par le travail musculaire fourni, afin d'obtenir un indice d'efficacité mécanique (Coyle et al. 1992).

La dépense énergétique va être principalement dépendante des modalités d'exercice (Åstrand et al. 1994) et de son environnement (Saunders et al. 2004), mais elle dépendra également de facteurs individuels. A notre connaissance, aucune étude n'a porté son intérêt sur le coût énergétique et l'efficacité mécanique associés spécifiquement à une tâche mobilisant les muscles paravertébraux. Néanmoins, ils sont souvent évalués dans les tâches de cyclisme (Gaesser & Brooks 1975) et de course (Lacour & Bourdin 2015), et il est aujourd'hui bien reconnu que le coût énergétique est un facteur de performance (Pollock 1977). Il peut dépendre des caractéristiques anthropométriques et anatomiques des individus, des patterns de recrutement musculaire, de l'extensibilité musculo-tendineuse, et de la capacité oxydative musculaire.

4.1 Influence des facteurs anthropométriques et anatomiques

Les caractéristiques anthropométriques des sujets doivent entrer en considération lorsqu'on s'intéresse au coût énergétique. Williams & Cavanagh (1987) ont en effet déterminé qu'un kilogramme de masse corporelle engendre une augmentation du coût énergétique lors d'une course de $0,6 \text{ mL}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. L'âge et le sexe seraient également des facteurs influents (Rowland et al. 1987). D'autres caractéristiques anatomiques, tels que la taille des membres inférieurs, influencent le coût énergétique pendant la course à pied (Saunders et al. 2004).

4.2 Influence du pattern de recrutement musculaire

Coyle et ses collaborateurs (1992) ont déterminé chez des cyclistes un haut niveau d'efficacité de pédalage. Ils ont d'abord suggéré que cela pourrait être attribué à une spécificité dans le comportement moteur, résultant de leur expérience dans la tâche. Néanmoins, le niveau d'efficacité était aussi augmenté chez ces individus lors d'un exercice d'extension du genou, auquel ils n'étaient pas habitués. Ainsi, même si le pattern de recrutement musculaire des cyclistes peut en partie expliquer le haut niveau d'efficacité lors des tâches de pédalage, cela ne suffit pas à expliquer pourquoi l'efficacité est également augmentée lors d'exercices non-spécifiques à la pratique du cyclisme.

Aujourd'hui, l'influence de tel ou tel pattern de recrutement musculaire lors d'une tâche spécifique aux muscles paravertébraux sur $\dot{V}O_2$ n'a jamais été abordée dans la littérature. Pourtant, un recrutement musculaire inadéquat lors de ce type de tâche pourrait limiter le niveau d'efficacité mécanique, et expliquer en partie le haut niveau de fatigabilité au regard des muscles paravertébraux, qui caractérise certains individus. Néanmoins, la littérature nous rapporte déjà que le pattern de recrutement musculaire pendant une tâche mobilisant les muscles paravertébraux peut se différencier d'un sujet à l'autre (Silfies et al. 2005). Des auteurs ont même montré que les stratégies motrices pendant un exercice de port de charge pouvaient être influencées au regard des muscles paravertébraux, par le niveau d'expertise de l'individu (Granata et al. 1999).

4.3 Influence de l'extensibilité musculo-tendineuse

Il a été montré qu'une bonne extensibilité musculo-tendineuse des membres inférieurs et du tronc permettait une diminution du coût énergétique de course (Godges et al. 1989). L'explication la plus pertinente face à cette observation réside dans la propriété de l'élasticité

musculaire, qui permet un stockage d'énergie temporaire lors de la phase d'étirement. Cette énergie pourra alors être transmise lors de la prochaine phase de contraction. On parle du cycle « étirement-contraction » (Asmussen & Bonde-Petersen 1974). Cependant, il existerait un niveau de souplesse optimal, au-delà duquel, le manque de raideur musculaire compromettrait le stockage et la transmission de l'énergie élastique. Un certain niveau de raideur musculaire permettrait non seulement une plus grande restauration de l'énergie élastique, emmagasiné au cours de la phase d'étirement, mais également une meilleure économie de course grâce au meilleur maintien des articulations (Gleim et al. 1990; Jones 2002).

La composante élastique des muscles paravertébraux pourrait être associée au rendement énergétique lors d'une tâche d'extension du tronc en influençant, d'une part, la restitution de l'énergie mécanique dans le cycle étirement-contraction, et d'autre part, la contribution musculaire requise pour la stabilisation du rachis.

4.4 Influence de la typologie et de l'efficacité mitochondriale

De nombreux travaux ont déjà mis aujourd'hui en évidence l'étroite relation entre la composition musculaire, au regard de la typologie des fibres, et le niveau d'efficacité mécanique. Ainsi, un haut pourcentage de fibres lentes a déjà été associé à un pédalage ou à une course plus économique (c'est-à-dire, avec un moindre coût en O₂) (Kaneko 1990), tandis que d'autres résultats témoignent d'une corrélation négative entre la proportion de fibres rapides et l'économie de course (Bosco et al. 1987). Cela amène à supposer que le recrutement de fibres de type I permet un meilleur rendement énergétique, grâce au plus haut potentiel oxydatif de ces fibres.

Au sein des fibres musculaires, l'efficacité mécanique peut être influencée par l'efficacité mitochondriale. En effet, d'après Broskey et collaborateurs (2015), la proportion d'ATP produit par rapport à la quantité d'O₂ consommée serait non seulement influencée par le volume mitochondrial, mais aussi par sa fonction. Cette amélioration de la fonction mitochondriale se traduirait notamment par une augmentation de la production maximale d'ATP par rapport au volume mitochondrial chez les sujets âgés (Conley et al. 2013). Toutefois ces observations n'ont pas été confirmées dans d'autres populations (Mogensen et al. 2006; Layec et al. 2016). Dans ces études, la relation entre l'efficacité lors d'une tâche de pédalage et une grande proportion de fibre de type I était confirmée, mais la mesure de l'activité mitochondriale effectuée après biopsie, ne permettait pas de mettre en évidence différents niveaux d'efficacités mitochondriales.

5. La cinétique de $\dot{V}O_2$

5.1 *Les différentes phases de la cinétique de $\dot{V}O_2$*

À l'exercice, les métabolismes anaérobies sont les premiers mis à contribution, puisque $\dot{V}O_2$ ne s'aligne pas directement avec les besoins du muscle en O_2 pour fournir l'énergie nécessaire. Ainsi, la cinétique de $\dot{V}O_2$ est composée de plusieurs phases (Whipp 1987; Xu & Rhodes 1999) (*Figure 7*).

La première phase est la « phase cardio-dynamique » qui correspond au délai de transit (TD) de l' O_2 à travers le réseau vasculaire : des capillaires pulmonaires jusqu'aux muscles actifs (Barstow et al. 1990). La « phase d'adaptation rapide » est la deuxième phase de la cinétique de $\dot{V}O_2$: $\dot{V}O_2$ va augmenter de manière exponentielle jusqu'à l'atteinte d'un état stable dans le cas d'exercices à intensité modérée. Plus cette phase est lente, plus le déficit d' O_2 au début de l'exercice, et par conséquent la sollicitation anaérobie, seront conséquents. Lorsque l'intensité d'exercice est élevée, une troisième composante apparaît, qui correspond à la « phase lente ». Lorsque l'intensité est très élevée, la $\dot{V}O_2$ augmente jusqu'à l'épuisement de l'individu, sans atteindre d'état stable.

5.1 *La modélisation mono-exponentielle*

Lors d'un exercice à intensité constante et modérée, la cinétique de $\dot{V}O_2$ peut être modélisée à partir d'un modèle mono-exponentiel (*Figure 7*). Ce modèle permet d'apprécier les adaptations métaboliques, qui seront caractérisées par une amplitude (A), c'est-à-dire la différence entre la consommation en O_2 de repos ($\dot{V}O_{2(0)}$) et la consommation en O_2 au plateau, par le temps de délai nécessaire pour l'apparition des réponses cardiorespiratoires (TD) qui caractérise la « phase cardiodynamique », et par la constante de temps (τ), qui correspond au temps nécessaire pour atteindre 63% de $\dot{V}O_2$ à l'état stable, qui caractérise la « phase rapide » (Whipp 1987; Xu & Rhodes 1999).

Ainsi, la réponse de $\dot{V}O_2$ au cours d'un exercice à intensité modérée peut être de la forme suivante, où t représente le temps :

$$\text{Équation 2 } \dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(0)} + A(1 - e^{-(t-TD)/\tau})$$

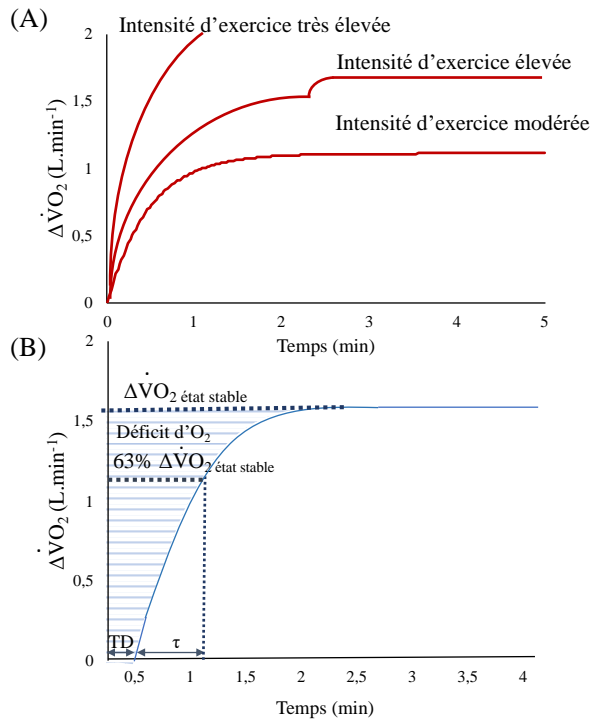


Figure 7 (A) Cinétique de $\dot{V}O_2$ en fonction de l'intensité de l'exercice (la phase cardiodynamique n'est pas modélisée) et (B) modélisation mono-exponentielle de la cinétique de $\dot{V}O_2$ au cours d'un exercice à intensité modérée et constante. ($\Delta\dot{V}O_2$ représente les valeurs de $\dot{V}O_2$ normalisées par les valeurs de $\dot{V}O_2$ au repos)

La modélisation de la cinétique de $\dot{V}O_2$ permet d'analyser la vitesse des adaptations à l'exercice. Elle reflète la vitesse à laquelle la contribution du métabolisme aérobie deviendra la principale source d'énergie. Lorsqu'elle est ralentie, la dette d' O_2 augmente et par conséquent, le délai de récupération post-exercice sera allongé, afin de rembourser le déficit d' O_2 (Gaesser & Brooks 1984). Au contraire, l'accélération des cinétiques de $\dot{V}O_2$ (c'est-à-dire, le raccourcissement du temps de réponse moyen, $TRM = TD + \tau$) est synonyme d'une contribution du métabolisme aérobie plus précoce, et permet ainsi de limiter la contribution du métabolisme anaérobie lactique.

5.2 Apport ou utilisation de l'oxygène : quel facteur limitant ?

Les adaptations hémodynamiques à l'exercice vont permettre d'augmenter l'apport de l' O_2 aux muscles actifs. L'accélération du transport de l'oxygène sera permise par des adaptations cardiaques (augmentation du débit cardiaque) et vasculaires (redistribution du volume sanguin vers les territoires actifs par processus de vasodilatation et de vasoconstriction) (Volianitis & Secher 2002). Dans le muscle, c'est l'activité mitochondriale enzymatique qui permettra d'augmenter l'utilisation de l' O_2 pour fournir l'énergie par la filière aérobie. Encore

aujourd'hui, les auteurs cherchent à déterminer lequel de ces deux facteurs (apport ou utilisation de l'O₂) limite la cinétique de $\dot{V}O_2$ à l'exercice.

5.2.1 L'apport en oxygène

Afin d'analyser le rôle de l'apport en oxygène sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ à l'exercice, Grassi et collaborateurs (1998, 2000) ont mené plusieurs travaux, et ont notamment injecté de l'adénosine, qui a une action vasodilatatrice, dans un muscle gastrocnémien de chien *in situ*. De cette manière, ils voulaient augmenter le débit sanguin jusqu'au compartiment musculaire, pour déterminer quel serait l'impact de l'augmentation de l'apport en oxygène sur la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$. Bien qu'ils aient conclu après avoir mené ces expérimentations que les modifications physiologiques effectuées n'avaient pas d'effets sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors d'un exercice à intensité modérée, ils ont précisé que la cinétique pourrait néanmoins être accélérée si l'intensité d'exercice était élevée. L'apport en O₂ pourrait donc avoir un impact sur la cinétique de $\dot{V}O_2$, mais uniquement lors des exercices à haute intensité.

Toutefois, Hughson et collaborateurs (2001) restent critiques quant à ces déductions. Ils signalent que dans ces travaux de Grassi et collaborateurs, les modalités d'utilisation de l'électrostimulation (utilisée pour provoquer la contraction), et les différentes manipulations du débit sanguin mises en place pour augmenter l'apport en O₂ représenteraient des réponses physiologiques aberrantes chez l'homme. Ainsi, ces éléments ne nous permettent pas d'affirmer que les observations seraient similaires *in vivo*, à l'exercice.

Chez l'homme, la modulation de l'apport en oxygène, par exemple en situation d'hyperoxie (Wilkerson et al. 2006) ne suffirait pas à accélérer la cinétique de $\dot{V}O_2$. Toutefois, puisque l'oxygène joue un rôle primordial dans la phosphorylation oxydative, il apparaît évident qu'une restriction de l'apport pourrait altérer la vitesse d'adaptation de $\dot{V}O_2$. Des auteurs ont ainsi voulu déterminer dans quels contextes cet apport pouvait être suffisamment restreint pour limiter la cinétique. Il a ainsi été déterminé que l'apport en O₂ pourrait être le facteur limitant de la cinétique de $\dot{V}O_2$ chez des personnes malades (Jones & Poole 2005), auprès d'individus ayant consommé des bêtabloquants (Hughson 1984), dans le cadre de tâches impliquant un positionnement du cœur dans l'espace en dessous du groupe musculaire actif (Hughson et al. 1991), dans des situations d'hypoxie, d'ischémie musculaire (Engelen et al. 1996). Alors, dans ces contextes d'exercices ou de populations spécifiques, la modulation de l'apport en O₂ pourrait permettre d'accélérer les cinétiques de $\dot{V}O_2$. Dans la plupart des cas cependant, le transport de l'oxygène ne semble pas être le facteur limitant. Ainsi, comme

énoncé par Poole & Jones (2012), « *Muscle O₂ delivery does not limit $\dot{V}O_2$ kinetics during most forms of exercise, in most subjects* ».

5.2.2 L'utilisation de l'oxygène

D'autres travaux ayant portés sur des sujets sains ont suggéré que la cinétique des adaptations relatives à l'apport de l'O₂ jusqu'aux muscles actifs serait en fait similaire, voire plus rapide que celle de $\dot{V}O_2$ (Grassi et al. 1996; Macdonald et al. 1997; Bangsbo et al. 2000). Cet élément corrobore l'idée que l'apport en oxygène n'est pas l'élément limitant la vitesse d'adaptation de $\dot{V}O_2$ à l'exercice. Ainsi, même si aujourd'hui le rôle de l'apport en O₂ sur la cinétique de $\dot{V}O_2$ fait encore l'objet de débats (Tschakovsky 2014), de nombreux éléments entretiennent l'hypothèse que le principal facteur limitant est l'utilisation de l'oxygène par le muscle. En d'autres termes, c'est la capacité oxydative musculaire qui déterminerait dans quelles mesures l'oxygène est utilisé au début d'un exercice.

Le délai d'adaptation nécessaire aux muscles pour produire de l'énergie par voie oxydative serait déterminé par l'activité enzymatique associée à la phosphorylation oxydative. Ainsi, il a déjà été suggéré que l'augmentation de la disponibilité des enzymes, tout comme celle du groupe acetyl- pourrait contribuer à accélérer la cinétique de $\dot{V}O_2$ (Timmons et al. 1998; Gurd et al. 2006). D'autre part, des études ont mis en évidence qu'au début de l'exercice, le taux de phosphocréatine diminuait, puis restait stable. Cette déplétion de la phosphocréatine se fait de manière parallèle à la $\dot{V}O_2$ (Rossiter et al. 1999). Ainsi, la phase 2 de la cinétique de $\dot{V}O_2$ serait le reflet de l'utilisation de l'O₂ par le muscle.

Aujourd'hui, les cinétiques d'adaptations des réponses aérobies n'ont jamais été rapportées dans la littérature lors d'un exercice sollicitant spécifiquement les muscles paravertébraux. Pourtant, l'étude de ces phénomènes dans différentes populations pourraient permettre de mettre en lumière une altération, ou au contraire une optimisation des réponses hémodynamiques et/ou métaboliques, à travers une décélération, ou au contraire une accélération de la cinétique de $\dot{V}O_2$. En plus, la littérature suggère déjà qu'à l'exercice, la qualité des réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux peut être compromise, même chez les sujets sains.

6. Le métabolisme aérobie des muscles paravertébraux : apport de la spectroscopie proche infrarouge

6.1 La limitation de l'apport en sang lors de la mobilisation des muscles paravertébraux

La spectroscopie proche infrarouge (*near-infrared spectroscopy*, NIRS) est une technique de mesure non-invasive basée sur les propriétés d'absorption de la lumière de l'hémoglobine. Grâce à la mesure de l'absorption, la NIRS nous apporte des indications sur les quantités d'oxyhémoglobines et de désoxyhémoglobines présentes au niveau musculaire. Ainsi, les variations à l'exercice des taux d'oxyhémoglobine (ΔHbO_2), de désoxyhémoglobine (ΔHHb) et du taux d'hémoglobine total (ΔTHb) au regard du muscle, peuvent être évaluées. ΔTHb est un bon reflet du volume sanguin musculaire. ΔHHb est le meilleur reflet de l'extraction de l' O_2 , puisque ΔHbO_2 est fortement dépendant de l'apport sanguin local. À partir de ces valeurs, des indices d'oxygénation peuvent être calculés (Indice d'oxygénation : $\text{OXY}=\text{HbO}_2-\text{HHb}$; Indice d'oxygénation tissulaire : $\text{TOI}=\text{HbO}_2/\text{HbO}_2+\text{HHb}$). Ils reflètent l'équilibre entre apport et utilisation de l' O_2 (Boushel et al. 2000 ; Ferrari et al. 2004, 2011 ; Jones et al. 2009).

Pendant la sollicitation du rachis, les modalités d'exercice peuvent compromettre le volume sanguin au regard des muscles paravertébraux. En effet, leur contraction peut être associée à une augmentation de la pression intramusculaire (Kramer et al. 2005) et ce phénomène peut être à l'origine d'une limitation du volume sanguin musculaire (diminution de ΔTHb), qui serait causée par l'écrasement des vaisseaux. Lors de simples maintiens de posture, la restriction serait plus importante avec l'inclinaison du tronc vers l'avant que vers l'arrière. En effet, la position d'extension permettrait plutôt une augmentation du volume sanguin musculaire par rapport à une condition de repos (Masuda et al. 2005). À l'exercice, l'augmentation de l'intensité d'exercice (avec l'ajout d'une charge) augmenterait davantage la pression intramusculaire dans les muscles paravertébraux et compromettrait d'autant plus le volume sanguin musculaire (Jensen et al. 1999).

Lors du test de Sorensen (qui représente aujourd’hui une référence pour l’évaluation de la fatigabilité des muscles paravertébraux) les équipes de Dupeyron (2009) et de Yoshitake (2001) ont mis en évidence une diminution de Δ THb, tandis que d’autres études ont retrouvé le phénomène inverse, au cours pourtant du même exercice (Kell et al. 2004; Albert et al. 2004; Kell & Bhambhani 2008; Maikala & Bhambhani. 2009) (*Figure 8*).

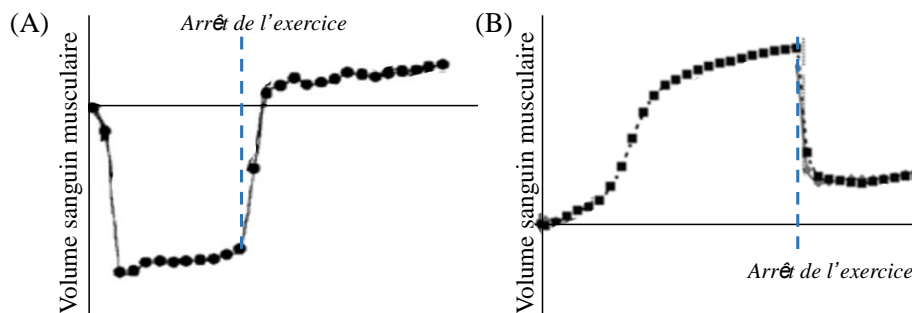


Figure 8 (A) Diminution et (B) augmentation du volume sanguin musculaire au regard des muscles paravertébraux, enregistrées par spectroscopie proche infrarouge, pendant le test de Sorensen. (Figure adaptée d’après les résultats de Yoshitake et al. 2001 ; Kell et al. 2004).

Face à cette hétérogénéité des résultats, il semblerait que des caractéristiques propres aux individus influencent l’hémodynamisme, ce qui pourrait expliquer la discordance entre les observations. Cela pourrait par exemple être attribué au niveau d’activité physique, qui peut modifier les réponses hémodynamiques à l’exercice (Green et al. 2011). D’autre part, des auteurs ont déjà suggéré que l’avancée en âge pourrait également avoir un impact sur ces réponses (Sakai et al. 2005), tout comme les stratégies de recrutement musculaire. En effet, McKeon et collaborateurs (2006) ont suggéré que les différents volumes sanguins observés entre deux populations au regard des muscles paravertébraux lors du test de Sorensen, pourraient être associés aux différents degrés d’implication des muscles paravertébraux et grands glutéaux.

6.2 L’impact sur l’oxygénation musculaire

Selon Dupeyron et collaborateurs (2009), il existerait un point critique, au-delà duquel l’augmentation de la pression intramusculaire serait associée à une altération de l’oxygénation musculaire, à cause de la restriction du volume sanguin. C’est-à-dire qu’au-delà de ce point, l’apport et/ou l’extraction en oxygène serait insuffisant pour combler les besoins musculaires. Aujourd’hui le point critique à partir duquel l’oxygénation musculaire peut être compromise n’est pas établi. En fonction des études, il se situerait entre 2% et 20% de la contraction

musculaire volontaire maximale, ce qui correspond à des intensités d'exercice faible (McGill et al. 2000). L'inadéquation entre apport/utilisation et besoin en O₂ lors d'un exercice impliquant le rachis pourrait finalement être à l'origine d'un haut niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux (Mori et al. 2016). Cependant, ce facteur n'est pas le seul à envisager comme étant le précurseur de la fatigue musculaire, puisque Van Dieën et collaborateurs (2009) ont enregistré des manifestations de fatigue neuromusculaire lors de contractions isométriques de faibles intensités et de faibles durées, sans altération de l'oxygénation musculaire.

Dans le contexte d'une restriction du volume sanguin, l'apport en O₂ pourrait alors être insuffisant pour répondre aux besoins requis par le système oxydatif musculaire. Dans ces cas, la restriction du volume sanguin (diminution de ΔTHb) peut être associée à une diminution de HbO₂ (Jensen et al. 1999), une diminution de OXY (Kell & Bhambhani 2003), ou encore une diminution de TOI (Yang et al. 2007) (*Tableau 1*). À notre connaissance, les valeurs de ΔHHb et de ΔTHb au regard des muscles paravertébraux n'ont jamais été rapportées en même temps. La présentation concomitante de ces deux variables permettrait pourtant de mieux appréhender l'impact de la restriction du volume du sanguin des muscles paravertébraux sur l'extraction de l'O₂ musculaire.

6.3 L'oxygénation musculaire lors de tâches fonctionnelles

Comme certaines activités professionnelles présentent une grande prévalence de lombalgie auprès des employés, des études se sont intéressées à évaluer les réponses métaboliques et hémodynamiques des muscles paravertébraux au cours de tâches bien spécifiques. C'est notamment le cas avec les tâches de conduite, qui soumettent le corps à des vibrations, ce qui compromettraient le volume sanguin et l'oxygénation des muscles paravertébraux (Maikala & Bhambhani 2006). Des auteurs ont même montré les effets bénéfiques que pouvaient avoir des sièges massants, afin de limiter ces altérations hémodynamiques et métaboliques pendant la conduite (Durkin et al. 2006).

Tableau 1 Tendances de courbes relatives au volume sanguin et à l'oxygénation des muscles paravertébraux, observées au cours de divers exercices.

	Protocole d'exercice	Évolution des paramètres NIRS
Albert et al. 2004	Test de Sorensen	↗ Δ THb ↘ OXY
Callaghan et al. 2010	Tâche manuelle debout et conduite	Pas de modification de OXY
Dupeyron et al. 2009	Test de Sorensen, contraction debout avec inclinaison vers l'avant ou vers l'arrière	↘ Δ THb pendant Sorensen ↘ TOI pendant l'inclinaison en avant et Sorensen
Jensen et al. 1999	Contraction isométrique 5%, 20%, 40%, 60% and 80% CMV	↘ Δ HbO ₂ dès 20% MVC
Kell & Bhambhani 2003	Port de charge (5 kg à la 1 ^{ère} minute puis +2,25 kg.min ⁻¹ ; 10 RPM)	↘ Δ THb, ↘ OXY
Kell & Bhambhani 2008	Test de Sorensen	↗ Δ THb, ↘ OXY
Kell et al. 2004	Test de Sorensen	↘ Δ THb, ↘ OXY
Maikala & Bhambhani 2006	Conduite	↗ Δ THb, ↘ OXY
Maikala & Bhambhani 2009	Test de Sorensen	↗ Δ THb, ↘ OXY
Maronitis et al. 2000	Port de charge (3 x 20 minutes ; 13,6 kg ; 12 RPM)	↗ Δ THb
Masuda et al. 2005	Contraction isométrique debout, et avec inclinaison du tronc vers l'avant ou l'arrière	↗ Δ THb , ↗ Δ HHb lors de l'inclinaison en arrière ; ↘ Δ THb lors de l'inclinaison en avant
McGill et al. 2000	Contraction isométrique à 2%, 5%, 10%, 20% et 30% de la CMV	↘ TOI au-delà de 2% CMV
Mori et al. 2016	Test de Sorensen	↘ TOI
Van Dieën et al. 2009	Contraction isométrique allongée (2% et 5% de la CMV)	↘ Δ HHb
Yang et al. 2007	Port de charge (4x 45 min à 120 min ; de 1,1 à 11,7 kg ; de 3 à 12 RPM)	↗ StO ₂
Yoshitake et al. 2001	Test de Sorensen (avec une inclinaison du tronc vers l'avant de 15°)	↘ Δ THb , ↘ OXY

(CMV : contraction maximale volontaire ; RPM : répétitions par minute ; THb : Hémoglobine total ; HbO₂ : Oxyhémoglobine ; HHb : désoxyhémoglobine ; Δ : valeurs normalisées par les valeurs de repos ; OXY : indice d'oxygénation ; TOI : indice d'oxygénation tissulaire)

Aussi, les effets des ports de charge sur l'oxygénation des muscles paravertébraux ont largement été étudiés, étant donné l'implication prédominante de ces muscles dans ce type de tâche. Comme pour le test de Sorensen, il n'existe pas de consensus quant aux évolutions du volume sanguin lors de ces exercices (*Tableau 1*). Plusieurs études, qui ont analysé des tâches de port de charge sur des durées de 20 minutes à 2 heures, ont rapporté une augmentation du volume sanguin musculaire, suggérant que la prolongation de l'exercice permettait l'accumulation d'agents vasodilatateurs (Maronitis et al. 2000; Yang et al. 2007). Au contraire, Kell & Bhambhani (2003) ont rapporté une diminution du volume sanguin. Or, dans cette dernière étude, les sujets devaient déposer des charges sur une table, après les avoir soulevées. Cette action nécessite une flexion du tronc vers l'avant. Or, la position de flexion du tronc compromettrait tout particulièrement l'apport en sang dans les muscles paravertébraux (Masuda et al. 2005).

Lors des tâches de port de charge, le niveau d'expertise des individus influencerait les patterns de recrutement musculaire (Granata et al. 1999). Dans ce contexte, Yang et collaborateurs (2007) ont suggéré que ceux-ci pourraient influencer sur les réponses hémodynamiques et métaboliques à l'exercice. L'adoption d'une stratégie motrice particulière pourrait être un moyen de protection, non seulement en limitant les traumatismes soumis au rachis, mais aussi en diminuant le stress métabolique.

Les données relatives aux réponses du métabolisme aérobie à l'exercice, au regard des muscles paravertébraux, sont aujourd'hui peu nombreuses dans la littérature. D'une part, les cinétiques d'adaptations et l'efficacité mécanique à l'exercice n'ont jamais été rapportées, et il est d'autre part impossible de conclure de manière consensuelle, sur les réponses relatives à l'hémodynamisme et à l'oxygénation musculaire. Tandis que ces réponses ne sont pas clairement définies chez les sujets sains, il semble difficile de pouvoir bien appréhender celles des patients lombalgiques chroniques, chez qui elles pourraient être altérées.

Pour étudier les réponses métaboliques et hémodynamiques des muscles paravertébraux à l'exercice, un protocole d'exercice standardisé, des méthodes de mesures et des critères d'inclusion pour les participants doivent être rigoureusement établis.

CHAPITRE 2

LA LOMBALGIE CHRONIQUE

I) La lombalgie chronique

La lombalgie est une pathologie désignant des sensations de douleur siégeant dans la partie basse du dos, au niveau des vertèbres lombaires. Les répercussions de la pathologie sur la vie des individus varient en fonction de la durée des symptômes (Dunn & Croft 2006). On parle de « lombalgie aiguë » lorsque les douleurs ne persistent pas dans la durée : elles n'évoluent pas au-delà d'une semaine, les capacités fonctionnelles s'améliorent dans le mois suivant l'apparition du symptôme douloureux. Si le symptôme douloureux persiste plusieurs semaines, on parle de « lombalgie subaiguë », tandis qu'à partir de douze semaines, on parle de « lombalgie chronique ».

1. L'épidémiologie de la lombalgie

D'après les chiffres rapportés par des études, on considère généralement que 8 personnes sur dix souffriront un jour de douleurs lombaires au cours de leur vie (Walker 2000). Mais la prévalence des lombalgies reste difficile à quantifier à cause des différences qui existent quant à sa définition, et en fonction du public interrogé au regard de la nationalité, de l'âge, et du sexe notamment (Hoy et al. 2014; Meucci et al. 2015). C'est dans les pays fortement industrialisés que la lombalgie est la plus répandue.

À partir des résultats obtenus à l'*Enquête Décennale Santé* (2002-2003) (n=14248) et à l'enquête *Handicaps, Incapacités, Dépendances* (n=6929), Gourmelen et collaborateurs (2007) ont déduit que plus de la moitié de la population française, âgée entre 30 et 64 ans, avaient souffert ou souffriront de lombalgie dans l'année, et que les symptômes perdureront sur plus de trente jours pour 17% des sujets interrogés. La lombalgie engendre même des répercussions sur la vie quotidienne pour 8% des sujets interrogés, on parle alors de lombalgie limitante.

Dès lors, la lombalgie est considérée aujourd'hui comme un réel problème de santé publique aux fortes répercussions socio-économiques, et d'autant plus lorsqu'elle devient chronique. En effet, le caractère persistant des symptômes est souvent associé à une diminution des capacités fonctionnelles, qui se traduit par une diminution de l'aptitude à effectuer les tâches de vie quotidienne, ce qui en contrepartie donne lieu à des situations d'incapacités (marcher, monter les escaliers, porter des sacs) (van Rooij et al. 2015). La diminution de ces capacités aboutit non seulement à des répercussions psychosociales, mais aussi professionnelles et économiques. Ainsi, cette pathologie représente un coût conséquent à cause des frais médicaux et des arrêts de travail qui lui sont associés (Hoy et al. 2014).

Il existe une grande diversité de profil des individus concernés par la lombalgie chronique, puisque la pathologie est marquée par une multi-dimensionnalité aussi bien face à l'étiologie, qu'aux facteurs responsables du passage à la chronicité, et qu'aux symptômes.

2. L'étiologie de la lombalgie

Les causes de l'apparition des lombalgies sont multiples. Elles sont souvent associées à une modification de la structure anatomique d'une composante du rachis (vertèbre, disque intervertébral, ligament ou muscle). On parle dans ce cas de lombalgies communes (ou non spécifiques). Elles peuvent survenir de manière brutale après un évènement traumatisant pour le rachis (on parle communément de « lumbago » ou de « tour de reins »), ou s'installer progressivement. Les lombalgies communes représentent 90% des lombalgies, tandis que dans les 10% des cas restants, la lombalgie est symptomatique (ou spécifique), c'est-à-dire secondaire à une autre pathologie (tumeur, infection). Dans ce cas, les douleurs lombaires ne sont qu'un symptôme, c'est la maladie sus-jacente qui doit être prise en charge.

2.1 *Dégénérescence discale*

La dégénérescence discale est associée à l'usure du disque intervertébral, résultant de l'addition des contraintes mécaniques auxquelles il est soumis au quotidien. Elle entraîne la diminution de la fonction protectrice des disques intervertébraux à cause d'une diminution de leur élasticité aboutissant à la modification de la stabilité et la mobilité du rachis, le rendant alors très vulnérable. La dégénérescence discale prédispose notamment à l'apparition d'une hernie discale, c'est-à-dire une saillie du noyau du disque intervertébral (*Figure 9*), pouvant engendrer la compression des racines nerveuses et donc l'apparition des douleurs (radiculalgie) (Bogduk 2005).

2.2 Lésion de l'arc ou du corps vertébral

Avec le vieillissement, le risque de développer de l'arthrite, de l'ostéoporose ou de l'arthrose au niveau des vertèbres lombaires, notamment au niveau de l'articulation inter-apophysaire, fragilise le rachis.

Les apophyses peuvent également être la source de douleurs si elles font l'objet d'anomalies anatomiques. C'est notamment le cas avec le syndrome « *kissing spines* », qui décrit l'accrochage entre deux apophyses successives, et qui peut être secondaire à une lésion du disque, à une extension du rachis trop importante, ou lorsque la lordose est très prononcée (Bogduk 2005). Des douleurs localisées sur les apophyses peuvent également apparaître lorsqu'un mouvement du rachis est répété ou mal exécuté. La douleur peut être associée dans ce cas au désalignement des facettes articulaires. Dans d'autres cas, on peut assister au tassement, voire à la fracture de la vertèbre, ou à son désalignement avec les autres vertèbres (le spondylolisthésis, Ferrero & Guigui 2018, *Figure 9*). Cette déformation peut être congénitale ou acquise, suite à des microtraumatismes répétés, notamment provoqués dans certaines activités sportives. Le spondylolisthésis concerne essentiellement le glissement de la quatrième vertèbre lombaire sur la cinquième, et le glissement de la cinquième vertèbre lombaire sur le sacrum. Le plus souvent, le spondylolisthésis est asymptomatique mais s'il entraîne la compression d'un nerf, il se manifeste par des lombalgies.

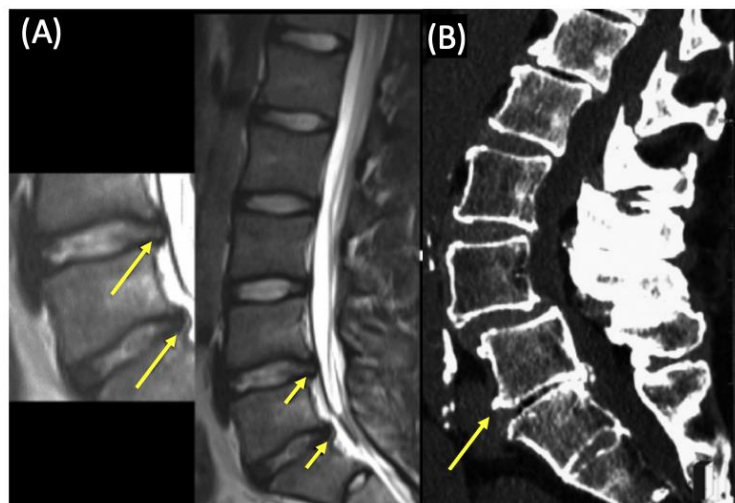


Figure 9 Images obtenues (A) par résonance magnétique d'un cas de hernies au niveau des disques situés entre les vertèbres L4-L5 et L5-S1 (B) et par CT-scan montrant un cas de spondylolisthésis de la vertèbre L4 sur L5. (Figure adaptée d'après Ferrero & Guigui, 2018 et Sharma et al. 2017).

2.1 Lésion d'un ligament

Les douleurs lombaires peuvent être secondaires à la déformation d'un ligament suite à une action répétée, un mouvement mal exécuté ou à une posture inappropriée. Par exemple, la répétition d'un mouvement de flexion du tronc vers l'avant peut engendrer l'accumulation de microtraumatismes, à cause des tensions excessives auxquelles les ligaments du plan postérieur vont être soumis. Aussi, une lordose inhabituelle et trop importante en position debout ou assise, comme par exemple souvent observée chez les femmes enceintes, peut aussi aboutir à des hypertensions ligamentaires (Sipko et al. 2010).

Les deux ligaments les plus susceptibles de provoquer des lombalgies sont les ligaments inter-épineux et iliolumbaires. En effet, des études ont montré que leur stimulation entraînait des douleurs dans le bas du dos et/ou dans les membres inférieurs. De plus, ils seraient davantage concernés par l'accumulation des microtraumatismes, par rapport au ligament jaune par exemple, qui présente peu de risque d'être lésé car il est très extensible (Bogduk 2005).

2.2 Lésion d'un muscle

Une sollicitation musculaire excessive en intensité, en durée ou mal exécutée peut amener à un traumatisme abîmant le tissu conjonctif ou les fibres musculaires, que l'on peut classer en fonction de sa gravité en plusieurs stades, d'après la classification de Rodineau (2005). Plus le stade est avancé, plus la lésion musculaire résultera d'une sollicitation violente. Le stade 0 concerne l'atteinte réversible de la fibre musculaire, sans atteinte du tissu conjonctif (contracture), le stade 1 concerne l'atteinte irréversible des fibres musculaires sans atteinte du tissu conjonctif, les stades 2 et 3 concernent la lésion des fibres musculaires et du tissu conjonctif avec un degré d'atteinte plus ou moins important (élongation ou claquage), tandis que le stade 4 concerne la rupture totale ou la désinsertion musculaire (déchirure totale des fibres musculaire). Dans le cas des muscles rachidiens, l'inclinaison et la combinaison de flexion-rotation peuvent entraîner ce type de lésions musculaires (Bogduk 2005).

Sans pour autant être associées à un traumatisme, des douleurs peuvent survenir si la musculature lombaire est trop faible. Dans ce cas, les muscles ne remplissent pas correctement leur fonction stabilisatrice, à cause du déséquilibre musculaire entre les muscles fléchisseurs et les muscles extenseurs du tronc (Lee et al. 1999).

3. Les facteurs de risque de la lombalgie et du passage à la chronicité

3.1 *Facteurs de risque liés à l'apparition de la lombalgie*

Certaines activités professionnelles présentent une proportion de lombalgies très élevée en comparaison à la prévalence de la pathologie dans la population générale. Les activités professionnelles étant un facteur de risque au développement d'une lombalgie sont celles qui nécessitent d'effectuer des actions sollicitant le rachis de manière répétée ou intense. Ainsi, les facteurs mécaniques à risque sont la manutention, la torsion ou la flexion du tronc de manière répétée, les ports de charges, l'exposition à des vibrations (conducteur de poids lourd, chauffeur de bus). Le maintien prolongé d'une position assise ou d'une posture contraignante est également un facteur de risque (Poiraud et al. 2004).

En conséquence aux traumatismes musculo-tendineux et ligamentaires qu'elle peut engendrer, la pratique intensive d'activités sportives peut également favoriser l'apparition de lombalgies, et plus spécifiquement les pratiques nécessitant une forte torsion du rachis telles que le tennis ou la gymnastique rythmique (Ribaud et al. 2013), tout comme celles qui l'exposent à des vibrations, telles que la conduite automobile. Toutefois, le faible niveau d'activité physique est également un facteur de risque. Heneweer et collaborateurs (2009) ont en effet déterminé en interrogeant 3664 individus, que la relation qui liait le niveau d'activité physique (en prenant en considération les activités quotidiennes de loisirs et les activités sportives) aux risques de développer une lombalgie, formait un U (*Figure 10*).

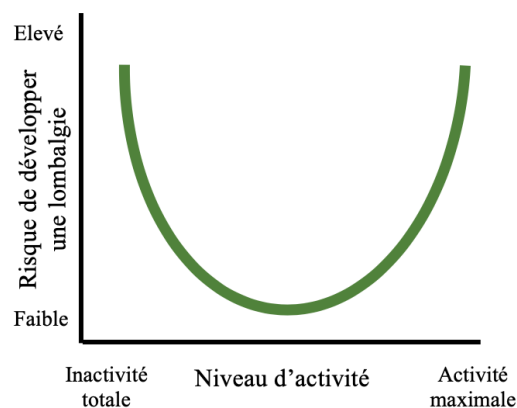


Figure 10 Relation en U entre le niveau d'activité physique et le risque de développé une lombalgie. (Figure adaptée d'après Heneweer et al. 2009).

Les sujets sédentaires, pratiquant moins d'une demi-heure d'activités modérées par jour, et les sujets les plus actifs (ceux qui pratiquaient à la plus haute d'intensité ou au plus grand nombre d'heures par semaine), étaient les groupes présentant les plus grandes prévalences de lombalgie. La plus faible prévalence de lombalgie était attribuée aux sujets pratiquant d'une à deux heures et demi d'activités sportives par semaine. L'activité physique peut donc avoir des effets opposés, en fonction de ses modalités de pratique. Dans une mesure, elle peut être le déclencheur de lombalgies et permet pourtant dans une autre mesure, de limiter le risque d'en développer.

En dehors des activités physiques et professionnelles, d'autres facteurs personnels vont favoriser l'apparition d'une lombalgie. Il a largement été montré que le surpoids et l'obésité (Shiri et al. 2010a), de la même manière que le déconditionnement physique (Verbunt et al. 2010), étaient liés à des cas de lombalgie. D'autres travaux ont mis en évidence une forte relation entre la lombalgie et la consommation de tabac (Shiri et al. 2010b), cependant, les mécanismes liant ces deux éléments restent obscurs. Kauppila et collaborateurs (2004) ont étudié le système cardiovasculaire de sujets lombalgiques. Ils ont montré que le réseau artériel, notamment au niveau de l'aorte abdominal présentait dans certains cas des dépôts athéromateux. Ces dépôts seraient secondaires à un haut niveau de cholestérol et/ou à une consommation excessive de tabac. En conséquence à cette athérosclérose, les réponses du métabolisme aérobie pourraient être altérées à cause d'un mauvais apport en oxygène jusqu'aux muscles paravertébraux. Ces potentiels éléments sous-jacents à la lombalgie ont déjà amené des auteurs à remettre en question l'adéquation des réponses hémodynamiques et métaboliques à l'exercice chez les patients lombalgiques chroniques.

Chez les femmes enceintes, l'augmentation du poids et le relâchement des ligaments du rachis causé par la grossesse entraînent dans 80% des cas des lombalgies. Bien que celles-ci puissent être transitoires, la prévalence post-partum était tout de même de 40% dans l'étude de Thorell & Kristiansson, 2012.

De plus, une étude prospective menée par Power et collaborateurs en 2001 a permis de mettre en évidence l'importance des facteurs psychologiques et sociaux dans l'apparition des lombalgies, en plus des facteurs évoqués précédemment. Ces facteurs sont la dépression, l'anxiété, le niveau d'éducation, la classe sociale, ainsi que le niveau d'épanouissement au travail (Power et al. 2001; Poiraudéau et al. 2004).

3.2 Facteurs de risque liés à la chronicisation de la lombalgie

Les facteurs psychosociaux et environnementaux ont un rôle prépondérant dans la chronicisation de la lombalgie, plus encore que les facteurs physiques et mécaniques. Nguyen et collaborateurs (2009) ont proposé une catégorisation de ces facteurs (*Tableau 2*).

Tableau 2 Facteurs de risque associés à la chronicisation de la lombalgie. (Tableau adapté d'après Nguyen et al. 2009).

Facteur de risque de chronicisation	
Facteurs individuels	Âge élevé
	Antécédent de lombalgie
	Sciatique
	Sévérité de l'incapacité fonctionnelle
	Durée de la lombalgie
	Sexe féminin
	Antécédent de chirurgie lombaire
	Mauvais état général avec arrêt maladie
	Autre douleur musculo-squelettique
	Intensité de la douleur
	Statut social non satisfaisant
	Statut psychologique global
	Capacité à "faire avec" (coping)
	Dépression
Avis global du médecin	
Facteurs professionnels	Insatisfaction au travail
	Indemnisation
	Arrêt de travail > 8 jours
	Mauvaise posture au travail
	Durée de transport de charges
	Absence de poste aménagé
	Faible qualification professionnelle
Inadéquation du salaire	

Au vu de sa haute prévalence dans les pays industrialisés, et ce depuis plusieurs décennies, la lombalgie chronique est caractérisée de « mal de siècle ».

Il existe une multitude de facteurs pouvant expliquer son apparition chez un patient, ainsi que son passage à la chronicité. Aussi, les conséquences de la pathologie sont diverses. Bien que la douleur soit le premier symptôme qui caractérise les lombalgiques, la nature des symptômes secondaires et leur gravité peuvent être différents d'un individu à l'autre.

II) Symptômes et physiopathologie de la lombalgie chronique

1. Les sensations de douleur

La présence de douleurs dans la partie basse du dos est le tout premier symptôme associé à la lombalgie. C'est d'ailleurs pour cela qu'on nomme cette pathologie ainsi : ce mot est composé de deux termes aux origines latine et grecque, lomb- du latin « *lombus* » pour le dos, et -algie, du grec « *algos* », pour la douleur.

La douleur a été définie en 1996 par l'association internationale pour l'étude de la douleur (International Association for the Study of Pain – IASP) comme « une sensation et une expérience désagréable en réponse à une atteinte tissulaire réelle ou potentielle ou décrites en ces termes » (Anand & Craig 1996). D'un point de vue physiologique, elle correspond à une activation des nocicepteurs, qui va transmettre l'information au système nerveux central. Au niveau du rachis, les stimuli nociceptifs peuvent provenir des ligaments, des apophyses articulaires, et des muscles (Fouquet et al. 2017).

2. Le versant psychosocial

Comme mentionné précédemment, la lombalgie chronique est associée à des facteurs psychologiques et sociaux, c'est pourquoi elle doit être considérée sous un angle psychosocial. Les individus lombalgiques chroniques sont fortement sujets à des troubles psychologiques tels que l'anxiété, la dépression, le catastrophisme et à des croyances erronées quant à leur maladie et aux facteurs aggravant les symptômes, qui amènent à des comportements d'évitement du mouvement. On parle de kinésiophobie (Thomas et al. 2010). La pathologie peut avoir des répercussions d'ordre social et professionnel. C'est pourquoi, il existe aujourd'hui de nombreux questionnaires permettant de quantifier l'état psychosocial, et les répercussions de la pathologie sur le mode de vie du lombalgique. Parmi ces tests, on peut notamment citer :

- Le questionnaire de Dallas, pour déterminer le retentissement de la lombalgie dans la vie quotidienne (Marty et al. 1998),
- L'Échelle d'Incapacité Fonctionnel pour l'Évaluation des Lombalgies (EIFEL), pour évaluer le retentissement fonctionnel et la douleur (Coste et al. 1993),
- Le questionnaire *Hospital Anxiety and Depression* (HAD), pour informer sur l'état émotionnel et déceler les troubles anxieux et dépressif lors d'une période d'hospitalisation (Lépine et al. 1985),

- Le questionnaire *Fear Avoidance Beliefs* (FABQ), pour évaluer les peurs et croyances qui mènent aux comportements d'évitement dans les activités physiques (FABQ-AP) et les activités professionnelles (FABQ-Pro) (Waddell et al. 1993),
- Le questionnaire *Short-Form 36* (SF-36), qui évalue la qualité de vie (Ware & Sherbourne 1992).

3. Les capacités musculaires

Les sujets lombalgiques chroniques sont caractérisés par une altération des performances musculaires qui se traduit par une diminution de la force et de l'endurance musculaire (Nourbakhsh & Arab 2002). Ces limitations dans les performances musculaires se traduisent essentiellement par une fatigabilité accrue des muscles paravertébraux à l'exercice (Kankaanpää et al. 1998b). On peut également dénoter une diminution de la force de ces muscles, ainsi qu'une diminution des performances au regard des muscles fléchisseurs du tronc, et des muscles fléchisseurs et extenseurs du genou (Lee et al. 1995). Toutefois, la diminution des performances musculaires relatives aux membres inférieurs n'est pas systématique (Yasuda et al. 2013) et pourrait dépendre de la durée et de l'intensité des symptômes (Dunn & Croft 2006). Les faibles niveaux de capacités physiques engendrent une diminution des capacités fonctionnelles (Duray et al. 2018).

La diminution des performances musculaires des lombalgiques chroniques est associée à une atrophie des muscles multifide et érecteurs du rachis, à une modification de la typologie musculaire avec une diminution de la proportion de fibres lentes (fibres de type I), en faveur d'une augmentation de celles de type rapide (fibres IIb), et à une infiltration graisseuse dans les muscles paravertébraux (Mannion et al. 1997b; Kalichman et al. 2017; Goubert et al. 2017).

De nombreuses techniques sont utilisées pour l'évaluation des paramètres de force et d'endurance musculaire. Leur évaluation est très importante car elle sera un reflet de l'incidence de la pathologie sur la condition physique du patient, et elle sera également utile pour le suivi de la pathologie du patient, par exemple pour évaluer les effets d'une prise en charge. Toutefois, la notion de force maximale volontaire est difficile à évaluer chez les lombalgiques chroniques, puisque ces sujets optent souvent pour des comportements d'évitement face aux mouvements à cause de la kinésiophobie (Thomas et al. 2010).

3.1 Test de Sorensen

C'est en 1964 que Hansen va développer pour la première fois ce test permettant l'évaluation de la fatigabilité à l'exercice des muscles extenseurs du tronc, peu coûteux et simple d'utilisation. Ce test consiste à positionner les patients en décubitus ventral, sur une table. La partie inférieure du corps (en dessous de la crête iliaque) est fixée à l'aide d'attaches au niveau du pelvis, des genoux et des chevilles. La partie supérieure du corps est hors de la table. Le test consiste à maintenir le haut du corps à l'horizontal, aligné avec la partie inférieure du corps, le plus longtemps possible. Ce test était au départ destiné à l'évaluation de l'endurance des muscles du rachis de sujets ayant subi une opération des muscles lombaires. Biering-Sørensen (1984) a repris ce test, validé sa reproductibilité, et déterminé qu'il existait un lien entre le temps de maintien au test et les sensations de douleur siégeant dans le bas du dos. Aujourd'hui, ce test est utilisé chez les patients lombalgiques pour évaluer leur déficit musculaire concernant l'endurance des muscles extenseurs du tronc (Verfaille et al. 2005).

3.2 Tests de port de charge

Les tests de port de charge consistent à demander aux patients de soulever une charge, avec une augmentation de celle-ci au fur et à mesure de l'exercice (Mayer et al. 1988). Ils permettent d'évaluer les capacités des sujets à effectuer une tâche proche de celles de la vie quotidienne (soulever et ranger des sacs de courses). Par conséquent, la phase de familiarisation n'est pas nécessaire, ce qui rend ces tests faciles à exécuter. En contrepartie, ils ne permettent qu'une faible maîtrise du mouvement exécuté, notamment face au recrutement musculaire qui accompagnera la stratégie motrice, à cause de l'importante liberté de mouvements. Dans ce contexte, Marras et collaborateurs (2001) ont montré que lors de ce type d'exercice, l'implication des différents groupes musculaires était différente entre les sujets lombalgiques chroniques et les sujets asymptomatiques. Finalement, ces tests permettent plutôt une évaluation des capacités fonctionnelles, que de la force ou de l'endurance musculaire (van Abbema et al. 2011).

Figure 11 Position du test de Sorensen.

3.3 Tests isocinétiques

L'association d'un dynamomètre isocinétique avec un module spécifique au rachis (*Figure 12*) permet l'évaluation des capacités musculaires. Cette technique permet de mettre en

place des exercices standardisés grâce au réglage de la vitesse, de l'amplitude, de la position et du nombre de répétitions. Les mesures sont ainsi précises et reproductibles, ce qui fait de cette technique un *Gold Standard* pour l'évaluation de la force et de l'endurance musculaire. L'isocinétisme a ainsi déjà permis de mettre en évidence des déficits musculaires chez des sujets lombalgiques chroniques (Yahia et al. 2011).

Gremion et collaborateurs (1996) ont également mis en évidence une diminution de la force des muscles extenseurs du tronc, par rapport aux fléchisseurs chez les lombalgiques chroniques. Dans cette étude, ce phénomène était mis en évidence à travers des rapports de force fléchisseurs/extenseurs du tronc supérieurs à 1, dans toutes les catégories d'âge, chez les individus lombalgiques chroniques. Chez les jeunes sujets sains, ces rapports se situaient entre 0,80 et 0,85 mais ils augmentaient pour les tranches d'âges supérieures à 40 ans pour les femmes, et supérieures à 50 ans pour les hommes. Ainsi, même si le niveau de force maximal peut être à la fois altéré au regard des muscles extenseurs et des muscles fléchisseurs du tronc chez les lombalgiques chroniques, ce sont bien souvent les muscles extenseurs qui sont le plus affaiblis.

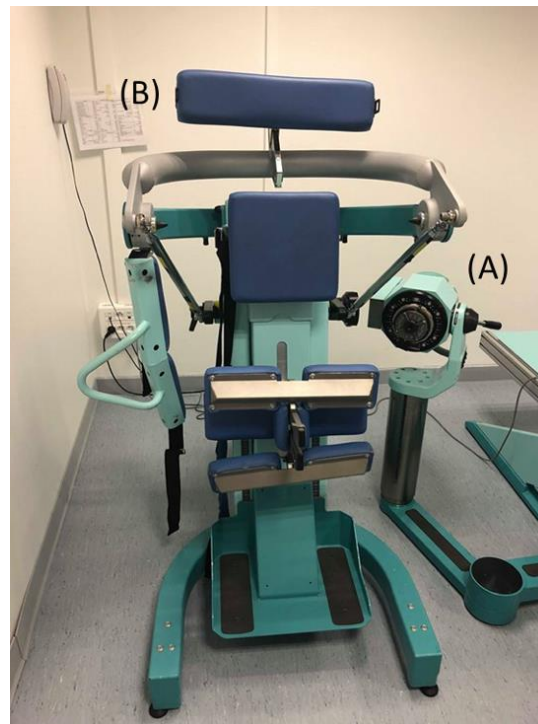


Figure 12 Dynamomètre isocinétique composé (A) d'un moteur et (B) d'un module rachis.

4. Les réponses neuromusculaires

Les patients lombalgiques chroniques sont caractérisés par des sensations de douleur siégeant dans le bas du dos, une diminution de l'endurance et de la force des muscles, une modification de la typologie et une atrophie des muscles paravertébraux (Mannion et al. 1997b). L'ensemble de ces paramètres est également associé à une modification de l'implication musculaire dans les activités physiques mais également lors de simples maintiens de posture. L'électromyographie (EMG) est une technique de mesure qui permet d'analyser le recrutement musculaire, par l'investigation de l'activité électrique des muscles.

4.1 L'implication neuromusculaire des muscles paravertébraux

4.1.1 Les modèles sur l'activation neuromusculaire

Chez les lombalgiques chroniques, il n'y a pas de consensus quant aux comportements neuromusculaires lors d'un exercice sollicitant les muscles extenseurs du tronc (van Dieën et al. 2003). Par exemple, Kankaanpää et collaborateurs (2005) n'ont pas souligné de différences concernant l'implication des muscles paravertébraux au cours d'un exercice dynamique d'extension du tronc, par rapport à des sujets non-lombalgiques. À l'encontre de cette observation, des études ont observé que le niveau d'activation des muscles paravertébraux serait augmenté chez les patients, tandis que d'autres études témoignent d'une diminution du niveau d'activation. Ces théories ont donné lieu à deux modèles, pour argumenter la modification de l'implication des muscles paravertébraux chez les lombalgiques chroniques (*Figure 13*) :

Le modèle « pain-spasm-pain »

Ce premier modèle a été proposé par Travell et collaborateurs (1942). Il suggère que la douleur serait associée à une hyperactivité musculaire. Ce modèle suppose qu'après l'activation des nocicepteurs, les neurones afférents transmettent le message aux motoneurones α via les interneurones excitateurs, ou en envoyant d'abord un feedback aux fuseaux neuromusculaires par l'intermédiaire des interneurones γ . Cela provoquerait ainsi une activation musculaire involontaire (spasmes) , qui augmenterait l'implication musculaire. Aussi, cette hyperactivité musculaire involontaire alimenterait les sensations de douleur.

Le modèle « pain-adaptation »

Ce modèle a été proposé par Lund et collaborateurs (1991). Il suggère que les sensations de douleur engendreraient plutôt une diminution de l'activité des muscles douloureux, lorsque ceux-ci sont agonistes dans la tâche à effectuer, suite à l'inhibition des motoneurones α . Toutefois, leur activation serait au contraire exacerbée lorsqu'ils seraient sollicités en tant qu'antagonistes (par exemple, l'activation des muscles paravertébraux lors d'une flexion du tronc), par l'excitation des motoneurones α . Dans ce modèle, les réponses neuromusculaires seraient un moyen de protéger les zones rachidiennes déjà endommagées. La diminution de l'implication pourrait aussi être liée à l'atrophie des muscles paravertébraux, notamment du muscle multifide (Hides et al. 1994). Cette altération neuromusculaire serait localisée à un seul niveau du rachis, là où siègent les sensations de douleur.

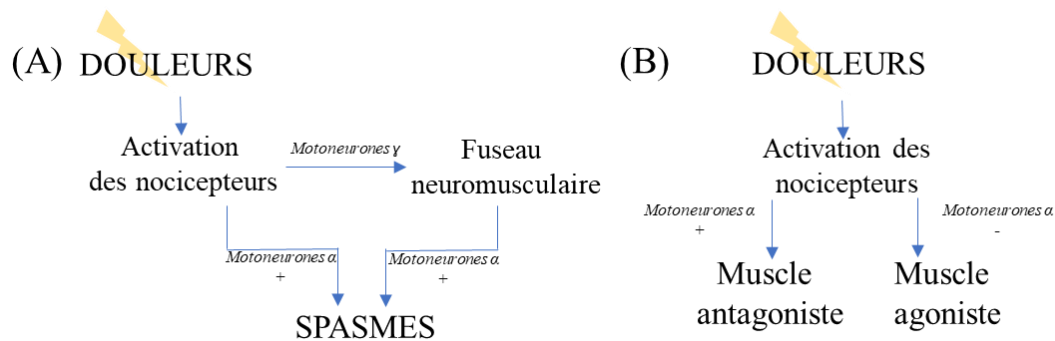


Figure 13 Représentation du (A) *pain-spasm-pain model* et du (B) *pain-adaptation model*. + représente une excitation ; - représente une inhibition des motoneurones α . (Figure adaptée d'après van Dieën et al. 2003).

Aujourd'hui les travaux ayant étudiés ces modèles ne nous permettent pas de conclure de manière consensuelle sur le niveau d'implication des muscles du lombalgique chronique lors de leur sollicitation. La revue de la littérature dirigée par van Dieën (2003) suggère néanmoins qu'en position statique, les muscles paravertébraux des lombalgiques auraient plutôt tendance à être sollicités davantage que ceux des sujets sains ; tandis que lors d'une mobilisation du rachis, leur sollicitation serait moindre. Dans ce contexte, les muscles co-agonistes seraient davantage sollicités chez les lombalgiques pour compenser la diminution de l'implication des muscles paravertébraux (Silfies et al. 2005). Cette augmentation de l'implication des muscles co-agonistes pourrait être une stratégie motrice pour diminuer les contraintes mécaniques qui s'exercent sur le rachis.

4.1.2 Ratio flexion/relaxation

Chez les lombalgiques, les études décrivent de manière consensuelle l'altération du ratio flexion/relaxation (van Dieën et al. 2003). Ce ratio décrit chez les sujets sains, un silence électromyographique lors d'une flexion complète du tronc. Chez les patients, ce silence n'apparaît pas, montrant une absence de relaxation des muscles extenseurs du tronc lors d'une phase de flexion. Cela serait attribué à des troubles musculo-tendineux (spasmes musculaires, réflexe d'étirement ; modèle « *pain-spasm-pain* ») ou à un mécanisme de protection pour les ligaments afin d'éviter un étirement excessif.

4.1.3 Activation posturale anticipée

Comme énoncé dans la première partie de la revue de la littérature, les muscles profonds du tronc peuvent limiter les déséquilibres en s'activant avant une perturbation posturale (Bouisset & Zattara 1981). Chez les sujets sains, l'activation posturale compensatoire s'effectue dans une fenêtre de temps s'étalant de -100 ms jusqu' à +50 ms, par rapport au début de la perturbation. De nombreuses études évoquent une altération du pattern de contraction musculaire lors des ajustements posturaux anticipés chez les lombalgiques. Dans l'étude de Silfies et collaborateurs (2009) l'activation des muscles abdominaux et paravertébraux était retardée par rapport à celle des sujets sains. Elle se produisait en dehors de la fenêtre temporelle. Toutefois, d'autres auteurs n'ont pas repéré de retard dans l'activité posturale anticipatoire des muscles du tronc des lombalgiques chroniques (Brooks et al. 2012; Massé-Alarie et al. 2015). Massé-Alarie et collaborateurs (2015) trouvaient néanmoins un délai d'activation supérieur pour les muscles semi-tendineux.

D'autre part, l'amplitude de l'activation des muscles paravertébraux lors de la phase d'anticipation serait également plus faible chez les lombalgiques chroniques. Cette diminution pourrait être un autre mécanisme de protection de rachis, à travers la diminution de son implication. Néanmoins, en conséquence, cela amène à une augmentation de l'amplitude des mouvements pour la stabilisation de la posture pendant l'exécution du mouvement (Mok et al. 2007).

4.2 *Fatigue neuromusculaire des muscles paravertébraux à l'exercice*

La capacité à maintenir une contraction volontaire est étroitement liée à la fatigue neuromusculaire, mesurable par la technique EMG (Merletti et al. 2001). Il n'existe pas non plus de consensus quant à cette fatigue au niveau paravertébral, lors d'un exercice sollicitant le dos chez les lombalgiques chroniques. Même si la fatigue neuromusculaire semble bien exacerbée chez les patients, cette dernière n'est pas toujours spécifique aux muscles paravertébraux. En effet, elle peut concerner les muscles paravertébraux directement (Pääsuke et al. 2002), ou elle peut être prématurée au regard des muscles co-agonistes uniquement (par exemple, les muscles biceps fémoraux) (Kankaanpää et al. 1998b; McKeon et al. 2006). Dans ce cas, la fatigue pourrait résulter de l'augmentation de l'implication des muscles co-agonistes, en vue diminuer celle des muscles paravertébraux (modèle « *pain-adaptation* »).

Aujourd'hui, aucun pattern d'activation musculaire n'est reconnu comme étant plus efficace pour maintenir le rachis en bonne santé. Toutefois, il semble que l'activité neuromusculaire des lombalgiques chroniques soit différente de celle des sujets sains au regard des muscles paravertébraux, abdominaux, biceps fémoraux et grands glutéaux. Ces résultats nous amènent à penser que les patterns de contractions pourraient être altérés par la lombalgie.

5. L'aptitude aérobie

L'évaluation de l'aptitude aérobie des sujets lombalgiques permet de déterminer s'il existe un déconditionnement physique de ces individus (*Tableau 3*). L'une des principales composantes de cette aptitude est $\dot{V}O_{2max}$, c'est-à-dire la consommation maximale d'O₂ des individus, qui est souvent évaluée à partir d'un exercice de pédalage ou de course.

$\dot{V}O_{2max}$ est difficile à déterminer chez les lombalgiques chroniques, puisque les comportements d'évitement du mouvement liés à la kinésiophobie, la faiblesse musculaire et les douleurs lombaires peuvent entraîner un arrêt prématuré de l'exercice maximal, et par conséquent, la non-atteinte des critères de maximalité attendus lors de ce type de test (Howley et al. 1995). Au moins la moitié des patients dans les études de Wittink (2000) (50%) et (Duque et al. 2009, 2011) (69%) et collaborateurs déclaraient avoir arrêté l'exercice à cause des douleurs musculaires. Dans ces cas, les valeurs de $\dot{V}O_{2max}$ mesurées en fin d'épreuve risquent d'être sous-estimées par rapport à l'aptitude aérobie maximale réelle, à cause de la faible tolérance à l'effort. Il est aussi possible de mettre en place des évaluations incrémentales en

mesurant les valeurs de $\dot{V}O_2$ à des intensités sous-maximales, pour ensuite déterminer $\dot{V}O_{2max}$ par extrapolation (Wittink et al. 2000). Cette technique apporte toutefois moins de précision que la mesure directe de $\dot{V}O_{2max}$.

Chez les lombalgiques chroniques, la plupart des études rapportent des $\dot{V}O_{2max}$ plus faibles, par rapport à un groupe contrôle (Rasmussen-Barr et al. 2008) ou par rapport à des normes établies (*Tableau 3*). Par exemple, en se basant sur l'échelle qualitative proposée par Shvartz & Reibold (1990) (*Tableau 4*), Duque (2009) et Doury-Panchout (2012) et collaborateurs ont conclu que les niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ des lombalgiques chroniques étaient faibles, voire très faibles. L'étude de Hodselmans et collaborateurs (2010) montre même que les faibles niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ des lombalgiques chroniques seraient indépendants du niveau d'activité physique des patients.

Tableau 3 Évaluation de $\dot{V}O_{2max}$ de sujets lombalgiques chroniques.

	Groupe LC N (H/F) Âge (Moyenne \pm ET)	Groupe contrôle N (H/F) Âge (Moyenne \pm ET)	Protocole	$\dot{V}O_{2max}$ mesurée ou estimée (mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹) Moyenne patients \pm ET (H/F) Moyenne contrôles \pm ET (H/F)	Observations principales /lombalgiques chroniques
Brox et al. 2005	45 (21/24) 47 \pm 10 ans	45 (22/26) 46 \pm 8 ans	Test sous-maximal (ergocycle)	31,8 \pm 8,6 34,7 \pm 9,0	Pas de différence entre les groupes ; pas de relation entre aptitude aérobie et douleurs
Doury-Panchout et al. 2012	71 (50/21) 42 \pm 9 ans	Classification de Shvartz	Test maximal (ergocycle)	21,6 (24,3/ 19,4)	Faible aptitude aérobie, $\dot{V}O_{2max}$ corrélé à la fonctionnalité et à l'activité professionnelle
Duque et al. 2009	101(62/39) 30 \pm 8 ans	Classification de Shvartz	Test maximal (ergocycle)	30,0 \pm 7,3 (31,9/27,1)	Faible aptitude aérobie
Duque et al. 2011	70 (37/33) 39 \pm 7 ans	70 (37/33) 39 \pm 7 ans	Test maximal (ergocycle)	30,8 \pm 7,8 (33,9 \pm 6,8/27,2 \pm 7,3) 37,0 \pm 7,0 (40,5 \pm 5,5/33,1 \pm 6,6)	Faible aptitude aérobie, surtout chez les femmes
Hoch et al. 2006	21 (0/21) 38 \pm 8 ans	20 (0/21) 36 \pm 8 ans	Test maximal (tapis de course)	35,8 \pm 8 40,6 \pm 8	Faible aptitude aérobie. Pas de différence de $\dot{V}O_2$ à une même intensité absolue
Hodselmans et al. 2010	101 (54/47) 39 \pm 10 ans	Normes (Base de données)	Test sous-maximal (ergocycle)	32,1 \pm 7,3 38,6 \pm 6,1	Faible aptitude aérobie
Rasmussen-Barr et al. 2008	57 (29/28) 38 \pm 11 ans	57 sains (29/28) 38 \pm 11	Test sous-maximal (ergocycle)	35,8 \pm 10,8 (38,1 \pm 10,6/33,6 \pm 10,6) 39 \pm 9 (38,2 \pm 8,5/39,8 \pm 9,7)	Faible aptitude aérobie uniquement chez les femmes
Smeets et al. 2006b	108 (63/45) 41 \pm 10 ans	18082 sujets de 17 à 70 ans (Base de données)	Test sous-maximal (ergocycle)	42,1 \pm 8,1 (40,0 \pm 7,9/44,8 \pm 7,7) 50,2 \pm -5,0 (50,0 \pm 4,4/50,4 \pm 5,6)	Faible aptitude aérobie, surtout chez les hommes

	Groupe LC N (H/F) Âge (Moyenne ± ET)	Groupe contrôle N (H/F) Âge (Moyenne ± ET)	Protocole	Valeur de $\dot{V}O_{2max}$ mesuré ou estimé Moyenne patients ± ET (H/F) Moyenne contrôles ± ET (H/F)	Observations principales /lombalgies chroniques
Smeets et al. 2009	175 (92/83) 40±10 ans	18082 sujets de 17 à 70 ans (base de données néerlandaise)	Test sous-maximal (ergocycle)	41,3±9,1(38,9±8,8/43,9±8,8) 49,8±4,4 (49,2±4,5/50,4±4,2)	Faible aptitude aérobie, surtout chez les hommes
van der Velde & Mierau 2000	258 (129/129) 34 ± 8 ans	1001 (415/586) 29 ± 10 ans	Step-test sous-maximal	Percentile par rapport à une norme établie en 1981 : 22,6 ± 10,0 %	Faible aptitude aérobie
Wittink et al. 2000	50 (22/28) 39,8 ± 8,3 ans	Normes (Protocole de Bruce)	Test sous-maximal (tapis de course)	34,7 ± 10,6 (39,3±10,4/30,9±9,4)	Aptitude aérobie normale chez les femmes. Proche de celle des sujets sains sédentaire chez les hommes.

Tableau 4 Classification des niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ (mL.min⁻¹.kg⁻¹) établie par Shvartz & Reibold (1990).

	Âge (années)	Très faible	Faible	Passable	Moyenne	Bonne	Très bonne	Excellente
Hommes	20-24	<32	32-37	38-43	44-50	51-56	57-62	>62
	25-29	<31	31-35	36-42	43-48	49-53	54-59	>59
	30-34	<29	29-34	35-40	41-45	46-51	52-56	>56
	35-39	<28	28-32	33-38	39-43	44-48	49-54	>54
	40-44	<26	26-31	32-35	36-41	42-46	47-51	>51
	45-49	<25	25-29	30-34	35-39	40-43	44-48	>48
	50-54	<24	24-27	28-32	33-36	37-41	42-46	>46
	55-59	<22	22-26	27-30	31-34	35-39	40-43	>43
60-65	<21	21-24	25-28	29-32	33-36	38-40	>40	
Femmes	20-24	<27	27-31	32-36	37-41	42-46	47-51	>51
	25-29	<26	26-30	31-35	36-40	41-44	45-49	>49
	30-34	<25	25-29	30-33	34-37	38-42	43-46	>46
	35-39	<24	24-27	28-31	32-35	36-40	41-44	>44
	40-44	<22	22-25	26-29	30-33	34-37	38-41	>41
	45-49	<21	21-23	24-27	28-31	32-35	36-38	>38
	50-54	<19	19-22	23-25	26-29	30-32	33-36	>36
	55-59	<18	18-20	21-23	24-27	28-30	31-33	>33
60-65	<16	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	>30	

Puisque le faible niveau d'activité physique est un facteur de risque au développement d'une lombalgie, le faible niveau de $\dot{V}O_{2max}$ pourrait également être un facteur d'apparition de la pathologie. Toutefois, les résultats de certaines études s'opposent à cette hypothèse, puisqu'elles ne montrent pas un affaiblissement de $\dot{V}O_{2max}$ chez les patients lombalgiques chroniques.

Par exemple, Brox et collaborateurs (2005) n'ont pas observé ce déconditionnement cardiorespiratoire chez les patients, en dépit d'un déconditionnement musculaire suggéré par un faible niveau d'endurance des muscles paravertébraux et abdominaux. Ainsi, l'aptitude aérobie d'un individu ne semble pas être directement associée à la fatigabilité des muscles paravertébraux, chez les lombalgiques chroniques. L'étude de Wittink (2000) a montré que les niveaux de $\dot{V}O_{2max}$, chez des femmes lombalgiques chroniques, se rapprochaient des valeurs obtenues par des sujets sains actifs (*Figure 14*). Aussi, un faible niveau de $\dot{V}O_{2max}$ ne serait pas prédictif de l'apparition des lombalgies chez les femmes enceintes ni chez les ouvriers, chez qui la prévalence de lombalgie est élevée (Battié et al. 1989; Thorell & Kristiansson 2012).

Puisque l'ensemble de ces résultats suggère que le faible niveau de $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas un facteur d'apparition de la pathologie, il pourrait plutôt être secondaire aux symptômes associés à la lombalgie chronique. Il résulterait du déconditionnement physique qui s'installe lorsque les symptômes perdurent.

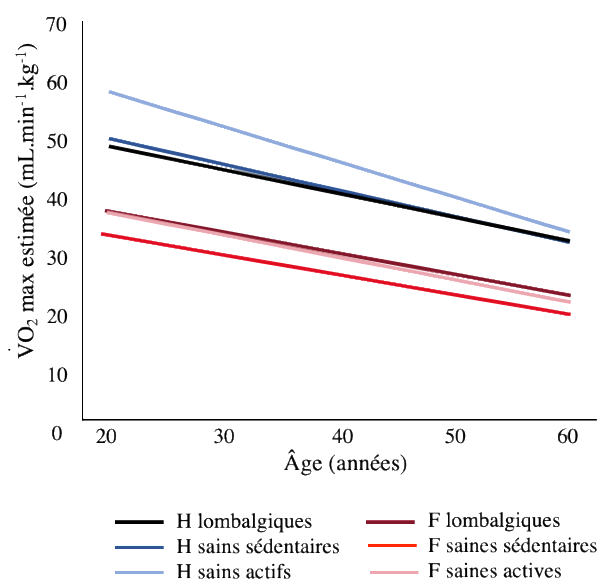


Figure 14 $\dot{V}O_{2max}$ estimé par la formule de Bruce chez des sujets sains actifs, sédentaires et des lombalgiques chroniques en fonction de l'âge. (H : hommes ; F : femmes). (D'après les résultats de Wittink et al. 2000)

Il n'existe pas de consensus concernant ce potentiel déconditionnement chez les lombalgiques chroniques, reflet de l'aptitude physique aérobie (Verbunt et al. 2003 ; Smeets et al. 2006a), mais la plupart des études montrent néanmoins de faibles niveaux de $\dot{V}O_{2max}$, suggérant un certain niveau de déconditionnement physique (*Tableau 3*). Cependant, il n'existe aucune corrélation entre $\dot{V}O_{2max}$ et la durée des symptômes, la reprise de l'activité professionnelle, le niveau d'activité physique, ou encore les capacités fonctionnelles (Wormgoor et al. 2008).

Ainsi, face à l'incertitude de la représentativité des valeurs mesurées par rapport à la réelle aptitude aérobie maximale des lombalgiques chroniques et de son indépendance face à la prédiction et l'évolution de la pathologie, l'évaluation de $\dot{V}O_{2max}$ représente finalement un intérêt limité. De plus, un tel niveau de $\dot{V}O_2$ n'est pas atteint dans les activités de la vie quotidienne, et donc par conséquent, son amélioration ne représente pas en soi un objectif dans la prise en charge des patients.

6. La consommation en oxygène à l'exercice sous maximal

Les données reposant sur les réponses métaboliques lors d'un exercice sous-maximal sont peu nombreuses. Hoch et collaborateurs (2006) ont toutefois observé dans leurs travaux que les valeurs de $\dot{V}O_2$ entre lombalgiques chroniques et sujets sains n'étaient pas différentes à un même niveau de perception de l'effort lors d'un exercice sur tapis de course. Cela suggère que la diminution de la tolérance à l'exercice qui caractérise les lombalgiques n'est pas associée à une augmentation de la consommation en oxygène, à l'exercice sous-maximal. Néanmoins, les valeurs de $\dot{V}O_2$ n'ont pas été rapportées à la vitesse de course. Cette étude ne nous apporte pas d'information concernant le coût en oxygène des patients, pour effectuer une tâche par rapport à des sujets sains.

Il serait intéressant d'évaluer le coût en oxygène, indicateur de l'efficacité mécanique, lors d'un exercice sollicitant spécifiquement les muscles paravertébraux en tant que muscles moteurs pour l'extension du tronc, et non en tant que simple stabilisateurs du tronc tel que dans un exercice de course.

7. Les réponses hémodynamiques et métaboliques des muscles paravertébraux à l'exercice sous-maximal

7.1 Relation entre réponses hémodynamiques à l'exercice et sensations de douleur

En 1990, Larsson et collaborateurs ont évalué le débit sanguin au niveau du muscle trapèze chez des personnes qui ressentaient des douleurs au niveau de la nuque et ils ont mis en évidence une altération de la microcirculation. Ils ont suggéré qu'un défaut dans les réponses hémodynamiques pourrait être associé à une mauvaise perfusion musculaire qui alimenterait les douleurs. Ce même phénomène reliant l'altération de l'hémodynamisme et les sensations de douleur pourraient être une cause de lombalgie chronique.

Comme mentionné dans la première partie de la revue de la littérature, la perfusion des muscles paravertébraux pourrait être limitée à l'exercice à cause de l'augmentation de la pression intramusculaire (Dupeyron et al. 2009) et au-delà d'un certain niveau, cela aboutirait même à une restriction de l'O₂ disponible au regard des muscles (McGill et al. 2000), compromettant l'oxygénation musculaire. L'étude de Konno (1994) a révélé que dans certains groupes de sujets lombalgiques (ceux souffrant d'ostéoporose, de spondylolisthésis, de syndrome du compartiment lombaire ou ceux qui avaient subi une chirurgie du rachis lombaire), les changements de posture engendraient de plus grandes pressions intramusculaires dans la loge paravertébrale par rapport à des sujets non-lombalgiques. Par conséquent, ces hauts niveaux de pression pourraient compromettre de manière conséquente la perfusion musculaire et l'apport en O₂. Le potentiel lien entre cette restriction et les sensations de douleur n'est aujourd'hui pas établi chez l'homme. Toutefois, il est encouragé par le modèle animal mis en place par Kobayashi et collaborateurs en 2010. Dans ce modèle, la pression dans les muscles paravertébraux de rats était augmentée, ce qui entraînait d'une part une diminution du flux sanguin, et d'autre part une augmentation de la sécrétion de la substance P (neuropeptide de la douleur) lors d'une flexion du tronc. Ce modèle peut être envisagé chez l'homme, puisque d'une part, la restriction du flux sanguin dans les membres inférieurs à l'exercice a déjà été associée à l'accumulation de métabolites (Suga et al. 2012; Teixeira et al. 2018), et que d'autres part l'accumulation de ces mêmes métabolites peut être à l'origine de sensations douloureuses (Pollak et al. 2014).

Aujourd'hui, le débit sanguin et l'oxygénation des muscles paravertébraux des lombalgiques chroniques peuvent être étudiés de manière non invasive par l'estimation du volume sanguin et de l'oxygénation musculaire, grâce à la technique de la spectroscopie proche infrarouge (NIRS) à l'exercice. Cette technique permet d'appréhender une potentielle altération des réponses métaboliques et/ou hémodynamiques musculaires à l'exercice, grâce aux mesures de ΔHbO_2 , de ΔHHb , reflet de l'extraction de l' O_2 , et de ΔTHb , reflet du volume sanguin musculaire total. À partir de ces valeurs, des indices ($\text{OXY}=\text{HbO}_2\text{-HHb}$; $\text{TOI}=\text{HbO}_2/\text{HbO}_2+\text{HHb}$) peuvent être calculés. Ils reflètent l'équilibre entre apport et utilisation de l' O_2 (Boushel et al. 2000 ; Ferrari et al. 2004, 2011 ; Jones et al. 2009).

7.2 Volume sanguin et oxygénation musculaire

7.2.1 Réponses à l'exercice

À l'exercice, des études utilisant la NIRS ont rapporté un plus faible ΔTHb au regard des muscles paravertébraux chez les lombalgiques chroniques par rapport à une population contrôle, au cours de simples inclinaisons du tronc (Kovacs et al. 2001) (*Tableau 5*). Dans ce contexte, la restriction du volume sanguin pourrait compromettre l'oxygénation du muscle, à cause d'un apport sanguin insuffisant pour satisfaire les besoins musculaire en O_2 .

Au cours du test de Sorensen, Kell & Bhambhani (2006a) ont observé chez des lombalgiques chroniques, par rapport à des sujets asymptomatiques, une altération de l'oxygénation (OXY) au regard des muscles paravertébraux, sans différence concernant les valeurs de ΔTHb . Cela témoigne d'une faible extraction de l' O_2 par le muscle chez les lombalgiques par rapport aux sujets sains, malgré un apport sanguin identique. Ces résultats suggèrent l'existence d'une altération du métabolisme aérobie musculaire associée à une faible capacité oxydative et indépendante d'un faible volume sanguin musculaire. Dans cette étude, les auteurs ont également montré l'existence d'une corrélation entre le temps de maintien au test de Sorensen et l'indice d'oxygénation musculaire. Ces éléments corroborent l'idée que la lombalgie chronique serait associée à une altération des réponses oxydatives musculaires à l'exercice, indépendamment des réponses hémodynamiques, et que cela serait à l'origine du haut niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux à l'exercice.

Néanmoins au cours du même exercice, McKeon et collaborateurs (2006) n'ont pas trouvé de différences entre les valeurs d'OXY de patients lombalgiques et de sujets sains. Ils ont néanmoins remarqué, en couplant les mesures NIRS avec des mesures

électromyographiques, que le recrutement musculaire était différent entre les groupes. En effet, les muscles biceps fémoraux et grands glutéaux étaient sollicités à un plus haut degré chez les lombalgiques. Ainsi, les auteurs ont suggéré que la modification de l'implication neuromusculaire des différents muscles pourrait être un moyen de protéger le rachis. Les lombalgiques limiteraient l'implication des muscles paravertébraux pour éviter non seulement la survenue de microtraumatismes au regard de leur rachis fragilisé, mais également la survenue d'un potentiel déséquilibre entre l'apport et les besoins en O₂.

Dans une autre étude comparative, aucune différence relative à HbO₂ entre sujets sains et sujets lombalgiques n'a été trouvée, au cours d'un exercice dynamique (Kankaanpää et al. 2005).

Face à l'hétérogénéité des résultats entre les différentes études, il semble judicieux de se demander si d'autres caractéristiques que les lombalgies chroniques pourraient influencer l'oxygénation musculaire. Au vu des résultats évoqués, il semblerait que le recrutement musculaire soit un facteur à considérer lorsqu'on s'intéresse aux réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux. Si ce dernier est différent chez les lombalgiques de telle manière que les muscles paravertébraux soient moins sollicités à l'exercice, les besoins en O₂ de ces muscles seront diminués.

Aussi, d'autres travaux suggèrent que le niveau d'activité physique pourrait influencer les réponses. En effet, les lombalgiques sédentaires seraient davantage associés à de faibles variations d'OXY à l'exercice par rapport aux lombalgiques actifs (Kell & Bhambhani 2006a). Les plus grandes variations d'OXY à l'exercice chez les lombalgiques actifs suggèrent une meilleure capacité oxydative. Cette différenciation entre actifs et sédentaires est probablement due aux effets bénéfiques de la pratique d'exercices physiques sur le métabolisme aérobie musculaire (Ryan et al. 2013a).

Un autre facteur à considérer est l'étiologie de la pathologie, puisque les lombalgies résultant de lésions musculaires, seraient davantage concernées par les faibles variations d'OXY à l'exercice, par rapport aux patients dont la cause initiale des douleurs est structurale (Kovacs et al. 2001). Dans ces cas, la lésion musculaire pourrait être associée à des dommages mitochondriaux, affectant le processus de phosphorylation oxydative, et donc la contribution du métabolisme aérobie à l'exercice.

Tableau 5 Études portant sur l'oxygénation des muscles paravertébraux chez les sujets lombalgiques chroniques.

	Patients lombalgiques chronique (H/F)	Protocole d'exercice	Observations principales
Kankaanpää et al. 2005	17/0	Répétitions de flexion/extension du tronc (avec charge)	Pas de différence de ΔHbO_2 chez les sujets contrôles et les sujets lombalgiques
Kell & Bhambhani 2006b	17/17	Test de port de charge	Altération de OXY chez les lombalgiques Augmentation du temps de récupération pour OXY et THb
Kell & Bhambhani 2006a	18 patients actifs 12 patients sédentaires	Test de Sorensen	Altération d'OXY uniquement chez les lombalgiques sédentaires. Augmentation du temps de récupération pour OXY
Kovacs et al. 2001	12/ 9 Avec altérations structurale ou musculaire	Répétitions de flexion/extension du tronc	Diminution de THb et altération d'OXY chez les lombalgiques, par rapport à un groupe contrôle ; d'autant plus chez ceux souffrant d'une altération musculaire
Kunimune et al. 1999	8/28 patients scoliotiques	Inclinaison statique du tronc vers l'avant (30s)	Diminution du temps de récupération du côté convexe pour ΔHbO_2
McKeon et al. 2006	17/29	Test de Sorensen	Pas de différence de TOI ni de THb avec le groupe contrôle, recrutement musculaire différent
Miyake et al. 2003	7/37 patients scoliotiques	Inclinaison statique du tronc vers l'avant	Diminution du temps de récupération du côté convexe pour ΔHHb
Olivier et al. 2013	12/12	Test de port de charge	Diminution de ΔTHb chez les lombalgiques par rapport à un groupe contrôle. Augmentation du temps de récupération pour OXY.
Sakai et al. 2005	50/0	Inclinaison statique du tronc vers l'avant et vers l'arrière	Moindre ΔHbO_2 chez les lombalgiques pendant l'inclinaison en arrière

(THb : hémoglobine total ; HHb : désoxyhémoglobine ; HbO₂ : oxyhémoglobine ; Δ : valeurs normalisées par les valeurs de repos ; OXY : indice d'oxygénation musculaire ; TOI : indice d'oxygénation tissulaire)

7.2.2 Les temps de récupération post-exercice

L'évaluation des délais nécessaires pour le retour à des conditions de repos des différentes variables après un exercice physique a pour but d'évaluer le temps nécessaire pour la re-saturation de l'hémoglobine et de la myoglobine en oxygène, et pour rétablir le volume sanguin dans les mêmes conditions qu'avant l'exercice (Grassi & Quaresima 2016). Ces délais sont un reflet des capacités oxydatives musculaires.

La potentielle altération du métabolisme aérobie au regard des muscles paravertébraux chez les lombalgiques chroniques a déjà été suggérée à travers des temps de récupération élevés pour un retour à un état d'oxygénation de repos qui suggère une faible capacité oxydative (Kell & Bhambhani 2006a) (*Tableau 5*). D'autres travaux ont montré qu'après un exercice de port de charge, on observait chez les patients non seulement une augmentation du délai pour un retour à un niveau d'OXY initial, mais également une augmentation du délai pour un retour à un volume sanguin musculaire de repos (Kell & Bhambhani 2006b; Olivier et al. 2013). Dans ce contexte, le faible volume sanguin pendant la récupération peut limiter l'apport en oxygène, et donc participer au ralentissement de la ré-oxygénation musculaire post exercice. La morphologie du rachis pourrait également influencer les délais de récupération (*Tableau 5*). Chez des patients atteints de scoliose, la récupération serait d'autant plus importante pour les muscles lombaires logeant du côté convexe du rachis, (c'est-à-dire, du côté où le muscle est le plus étiré) (Kunimune et al. 1999; Miyake et al. 2003). Les valeurs relatives à ΔTHb n'ont pas été présentées dans ces études, et il est alors impossible de déterminer si l'altération de l'oxygénation est liée à un faible volume sanguin musculaire. Puisque l'adéquation de l'oxygénation musculaire semble pouvoir être influencée par le volume sanguin musculaire, les variables mesurables par la spectroscopie proche infrarouge méritent d'être étudiées de manière concomitante, pour une bonne interprétation.

L'analyse concomitante des valeurs d'oxygénation musculaire et de ΔTHb n'est pas systématique. Elle permettrait pourtant de mieux comprendre si l'altération de l'oxygénation musculaire chez les lombalgiques chroniques (souvent mise en évidence par de faibles variations d'OXY à l'exercice par rapport aux valeurs de repos) est dépendante de la restriction du volume sanguin au regard des muscles paravertébraux, ou si elle existe malgré un volume sanguin musculaire semblable à celui de sujets sains. D'autre part, puisqu'OXY est dépendant

de ΔHbO_2 qui est influencé par l'apport en O_2 jusqu'au compartiment musculaire, ΔHHb peut être considéré comme un meilleur reflet de l'extraction de l' O_2 , et donc de la capacité oxydative musculaire (Jones et al. 2009). Son analyse doit alors d'être privilégié lorsqu'on s'intéresse à évaluer les réponses aérobie des muscles paravertébraux.

8. La spirale du déconditionnement

Dans les maladies chroniques, la condition du patient est souvent liée à un processus auto-entretenu qu'on appelle le cercle vicieux du déconditionnement (*Figure 15*). Dans le cadre de la lombalgie, les différents symptômes s'entretiennent les uns avec les autres, entraînant les sujets dans une situation de lombalgie limitante aux conséquences multiples, sur les plans physique, psychologique, social et économique (Mayer et al. 1985).

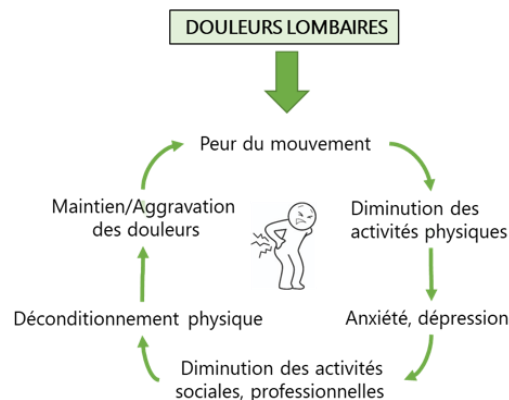


Figure 15 Cercle vicieux du déconditionnement physique et psychosocial du lombalgique.

La diminution de l'endurance et de la force musculaire menant à une diminution des capacités fonctionnelles, et associée aux douleurs, va entraîner une diminution du potentiel physique, privilégiant l'apparition de limitations fonctionnelles. Cela va engendrer une kinésiophobie et par conséquent une diminution de l'activité physique et quotidienne, pouvant mener jusqu'à l'immobilisation du sujet. Les symptômes vont également entraîner une diminution des activités psychosociales, une augmentation de l'anxiété face à la pathologie, et dans certains cas l'arrêt de l'activité professionnelle. L'ensemble de ces phénomènes va entretenir, voire exacerber les sensations de douleur.

Au fil des décennies, la compréhension de la lombalgie s'accroît, et en parallèle, les prises en charge des patients évoluent. Toutefois, la prise en charge des lombalgies reste complexe, puisqu'en fonction des individus, les bénéfices permis par telle ou telle prise en charge varient ; tous les patients ne répondent pas de la même manière aux soins qui leur seront prodigués.

Après la chronicisation des symptômes, les patients s'enferment dans un cercle du déconditionnement, ce qui va entretenir les symptômes douloureux, les limitations fonctionnelles et psychosociales. Ainsi, briser le cercle du déconditionnement représente aujourd'hui le principal objectif des prises en charge.

III) Le traitement de la lombalgie

Face à l'augmentation dramatique de la prévalence de la lombalgie et de ses répercussions économiques depuis les années 1950, Waddell en 1987 a fait le point sur les connaissances et les traitements envisageables pour la lombalgie. Aujourd'hui, les connaissances quant à l'efficacité des traitements continuent d'évoluer. La chirurgie du rachis représente une option dans certains cas de lombalgies. Elle consiste soit à re-stabiliser le rachis (comme dans le cas d'un spondylolisthésis), soit à supprimer la zone allogène (comme dans le cas d'une dégénération discale). Toutes les lombalgies ne sont pas opérables, et l'opération chirurgicale représente une option coûteuse et risquée, qui n'est ainsi proposée au patient qu'en dernier recours. La mise en place de traitements non invasifs est privilégiée avant un potentiel recours à une opération (Vital et al. 2015).

1. Évolution de la prise en charge

Pendant longtemps, le traitement de la lombalgie chronique consistait à préconiser une période de repos physique associé à un traitement médicamenteux aux patients. Il existe une grande diversité face aux traitements médicamenteux proposés aux lombalgiques chroniques, et les études qui s'y sont intéressées sont très nombreuses. La revue de la littérature écrite par Malanga & Wolff (2008) montre que les médicaments les plus prescrits à des patients souffrant de lombalgies chroniques sont les analgésiques, les anti-inflammatoires non stéroïdiens, et les myorelaxants. Les analgésiques visent à diminuer les sensations de douleur. Parmi ces derniers, on trouve aussi les opioïdes, dont l'efficacité a été reconnue, mais aux nombreux effets indésirables quand le traitement est prolongé, tel que l'apparition d'un déficit cognitif (Schiltenswolf et al. 2014). De plus, ce type de traitement peut provoquer une dépendance (Dersh et al. 2008). Les relaxants musculaires ont un effet sur les douleurs et la spasticité, mais ils sont associés à des sensations de vertige et de sédation. Ils peuvent aussi être associés à un comportement de dépendance médicamenteuse. Les anti-inflammatoires non stéroïdiens permettent une meilleure gestion de la douleur à court terme, mais encore une fois, les effets secondaires ne sont pas à négliger, puisqu'ils sont associés à une augmentation des risques de complications gastro-intestinales, rétiniques, hépatiques, ainsi qu'à de potentiels effets secondaires délétères sur le système cardiovasculaire.

Associé au traitement médicamenteux, le repos était autrefois largement préconisé car la position de décubitus permet un soulagement du rachis, et donc une diminution des sensations

de douleur. Toutefois sur le long terme, des effets néfastes sont à déplorer. Waddell (1987) a mis en avant ces effets pour le traitement de la lombalgie non seulement d'un point de vue physique (diminution de l'aptitude aérobie, de la masse musculaire), biologique (déméralisation de l'os, altération des processus de cicatrisation) mais aussi psychosocial (augmentation de la détresse psychologique, de la dépression, arrêt prolongé de l'activité professionnelle). Il concluait en suggérant que le repos prolongé était nuisible contrairement à l'activité. La mise au repos des patients souffrant de lombalgie chronique n'est ainsi plus considérée comme une option pour le traitement des patients. Au contraire, il est aujourd'hui bien admis que finalement, l'activité physique n'augmente pas les sensations de douleur, et que les traitements actifs de la lombalgie chronique permettent de nombreux bénéfices à court et long termes, qui seront présentés dans la prochaine partie de cette thèse. Les bénéfices seraient supérieurs à ceux permis par une période de repos (stratégie du « *wait & see* »), ou encore par rapport à d'autres prises en charge passive telles que la manipulation, l'électrostimulation, l'acupuncture (van Tulder et al. 2000). De plus, pour optimiser les bénéfices, la pratique d'activités ne devrait pas être dosée en fonction des sensations de douleur (« *let pain be your guide* ») (Fordyce et al. 1986), mais plutôt être encouragée malgré ces dernières.

La pratique d'activités physiques est ainsi recommandée chez les patients lombalgiques chroniques. Mais au-delà de la prise en charge physique, la Haute Autorité de Santé (HAS) recommande la prise en charge multidisciplinaire des patients, au vu de la physiopathologie et de la psychopathologie complexes qui caractérisent les lombalgiques chroniques. La HAS préconise ainsi une prise en charge biopsychosociale de la pathologie. (Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé, Service des recommandations et références professionnelles, 2000)

2. Le modèle biopsychosocial

Le psychiatre Adolf Meyer (1917) a suggéré que les maladies devaient être considérées sous une approche multi-causale, et qu'il était nécessaire de reconnaître la composante psychosociale de la maladie pour sa prise en charge. Cette approche s'oppose au concept de René Descartes (1596-1650) qui divisait le corps et l'esprit, faisant de la douleur un simple réflexe en réponse à un stimulus. Le modèle biopsychosocial considère que la perception individuelle de la douleur est influencée par des facteurs psychologiques et sociaux. Ce modèle est encouragé chez les lombalgiques chroniques par la grande influence des facteurs

psychosociaux dans la chronicisation des symptômes, sur la gestion des douleurs, sur le succès ou non du traitement proposé et sur le retour à l'activité professionnelle.

Le modèle de Loeser place ainsi la nociception en tant que première composante de la douleur, mais celle-ci va entraîner une souffrance physique et psychologique, qui va impacter sur le comportement du patient. Dans une approche clinique, Waddell (1987) suggère que la prise en charge doit être axée en vue de résoudre le problème physique, mais les praticiens doivent aussi avoir conscience de la détresse et des comportements du patient (*Figure 16*).

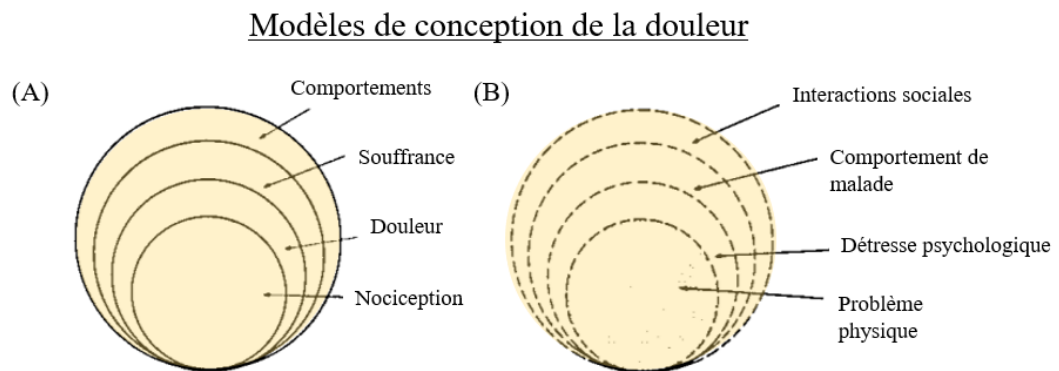


Figure 16 (A) Modèle conceptuel de la douleur (modèle de Loeser) et (B) modèle clinique de la douleur (modèle de Waddell). (Figure adaptée d'après Waddell 1987).

La lombalgie chronique est une pathologie multidimensionnelle. Les causes qui peuvent lui être attribuées sont nombreuses, et parfois même indéfinies. Aussi, les symptômes qui lui sont associés peuvent différer d'un individu à l'autre, tout comme les répercussions de la pathologie dans la vie quotidienne. Ainsi, il est impossible de déterminer un profil type du patient lombalgique chronique.

Au vu de l'ensemble des caractéristiques de la pathologie et de la potentielle altération des réponses du métabolisme aérobie au regard des muscles paravertébraux, l'activité physique semble être un outil judicieux pour la prise en charge des lombalgies chroniques. Un travail musculaire général du corps semble être nécessaire pour palier à la diminution des capacités physiques généralisée (muscles abdominaux, paravertébraux, biceps fémoraux, grands glutéaux...) tandis que la pratique d'exercices aérobies pourrait permettre d'améliorer la tolérance à l'effort, lors d'exercices fonctionnels quotidiens (marche, course, monter les escaliers).

CHAPITRE 3

LA PRATIQUE CHRONIQUE D’ACTIVITES PHYSIQUES: EFFETS CHEZ LE SPORTIF ET CHEZ LE LOMBALGIQUE CHRONIQUE

I) Influence de la pratique d’activités physiques et sportives

1. Les bienfaits généraux pour la santé

Les bienfaits liés à la pratique d’activités physiques régulières ont fait l’objet de nombreuses campagnes ces dernières années. Ainsi l’Organisation mondiale de la santé (2010) recommande aux personnes âgées entre 18 et 64 ans, de pratiquer de l’activité physique à une intensité modérée pendant 150 minutes chaque semaine, ou au moins 75 minutes d’activités d’endurance à intensité soutenue, ou une combinaison équivalente d’activités à intensité modérée et soutenue (Vuillemin 2011). Elle préconise également, en supplément aux activités d’endurance, des exercices de renforcement musculaire au moins deux jours dans la semaine. Cet engouement pour la pratique d’activités physiques est justifié par les nombreuses études qui ont montré les bénéfices de celle-ci sur le bien-être physique et mental (Warburton & Bredin 2017), qu’elle permettait de diminuer les risques de développer des maladies cardiaques ou artérielles, et améliorerait les conditions de vie des patients atteints de maladies chroniques (Penedo & Dahn 2005). Un bon moyen de répondre à ses recommandations est la pratique d’une activité sportive.

2. Les effets de la pratique d’activités physiques et sportives

2.1 *L’implication des muscles du tronc*

Les muscles du tronc et notamment ceux sur le plan postérieur (les muscles paravertébraux), ont un rôle prépondérant dans les activités sportives. En effet, toutes les activités sportives les sollicitent de manières statiques et/ou dynamiques. Certains athlètes présentent ainsi des muscles extenseurs du tronc plus forts et plus endurants par rapport à une population non sportive (Andersson et al. 1988). Cela est d’autant plus vrai dans le cadre de pratiques sollicitant de manière intensive les muscles du tronc (Kort & Hendriks 1992).

C’est dans ce contexte que s’est développé le concept du « *core training* », qui se réfère à la fois à la notion de stabilisation du rachis par le contrôle lombo-pelvien ainsi qu’à celle de force et d’endurance musculaire (Hibbs et al. 2008 ; Prieske et al. 2016 ; Clark et al. 2018). Il consiste à renforcer l’ensemble des muscles du tronc : les muscles abdominaux, les muscles paravertébraux et glutéaux et les muscles du plancher pelvien. Même sans renforcement spécifique de cette zone, les pratiques sportives qui mobilisent le tronc (comme le golf, le judo...), tout comme celles qui requièrent les muscles du tronc comme simple stabilisateurs (comme la course à pied) permettent des ajustements du contrôle lombo-pelvien. Ces ajustements sont néanmoins prédominants lorsque la pratique est associée à une sollicitation spécifique des muscles du tronc (Glofcheskie & Brown 2017). Outre l’augmentation de la stabilisation du rachis, la modification du contrôle lombo-pelvien des sportifs est également associée à un ajustement des recrutements musculaires pendant les tâches dynamiques. Une des modifications notable est l’augmentation de la sollicitation des muscles extenseurs de la hanche, pour effectuer l’extension du tronc (Van Oosterwijck et al. 2017).

Étant donné leur implication dans les pratiques sportives, van Dieën et collaborateurs (2012) ont suggéré qu’il était pertinent, dans le cadre des entraînements sportifs, de consacrer du temps pour augmenter l’endurance des muscles du tronc afin de repousser leur fatigabilité. L’ajout de cette modalité d’entraînement pourrait être un moyen de limiter les risques de blessures (Chaudhari et al. 2014; Abt et al. 2007) et d’améliorer la performance sportive (Imai & Kaneoka 2016). Toutefois, face à l’apparition d’une fatigue neuromusculaire des muscles paravertébraux, des recrutements musculaires compensatoires peuvent s’opérer, pour ainsi permettre de préserver le rachis d’éventuelles blessures (Clark et al. 2003).

2.2 Adaptations des réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux

2.2.1 La capacité oxydative musculaire

Aujourd’hui, la littérature ne nous apporte aucune information quant à la spécificité des réponses métaboliques à l’exercice au regard des muscles paravertébraux chez des sujets sportifs. Il est alors impossible d’affirmer que l’entraînement sportif peut modifier les réponses de ces muscles à l’exercice. Néanmoins, les effets de l’entraînement sur le métabolisme aérobie au regard d’autres muscles ont quant à eux largement été étudiés.

L’entraînement musculaire en force, en endurance des membres inférieurs (Uchiyama et al. 2011) et l’entraînement en aérobie sur ergocycle (Neary et al. 2002) sont associés à un plus haut niveau de désoxygénation du quadriceps à l’exercice, suggérant une modification des réponses du métabolisme associée à une augmentation de la contribution aérobie. Dans ce contexte, l’augmentation de la désoxygénation musculaire peut être attribuée à l’augmentation de l’activité enzymatique. Il a en effet déjà été montré que de tels effets pouvaient être permis au regard du quadriceps, par une période de renforcement musculaire des membres inférieurs (Tang et al. 2006), ou même par une période d’entraînement aérobie (Kelly et al. 2018). Les deux types de pratique peuvent ainsi améliorer les capacités oxydatives musculaires.

Il est toutefois aujourd’hui clairement admis que c’est davantage l’entraînement en endurance qui permet une modification de ces réponses (Jones & Carter 2000). En plus de l’augmentation de l’activité enzymatique, l’entraînement sportif peut aussi permettre l’augmentation de la densité mitochondriale (Meinild Lundby et al. 2018) et de la proportion des fibres de type I (Coyle et al. 1992). Ces phénomènes contribueront à l’augmentation des capacités oxydatives musculaires.

2.2.2 Les réponses hémodynamiques centrales et musculaires

La modification des réponses hémodynamiques à l’exercice permet d’optimiser le flux sanguin, pour favoriser l’apport en oxygène jusqu’aux muscles par le réseau artériel, les échanges au niveau micro-vasculaire, et le retour veineux. Certains auteurs n’ont néanmoins pas mis en évidence une modification du flux sanguin en réponse à l’entraînement sportif chez des sujets sains. Dans ce contexte, Hellsten & Nyberg (2015) ont suggéré dans leur revue de la littérature que la modification du flux sanguin pouvait dépendre de la qualité des réponses

hémodynamiques pré-entraînement. Ce serait dans le cas d’un flux sanguin musculaire inadéquat pour satisfaire les besoins musculaires en O₂ initial, que l’entraînement pourrait le modifier. Dans ces cas, l’entraînement ou le réentraînement pourrait être un moyen de mieux équilibrer l’apport en O₂ avec les besoins (Beere et al. 1999).

Au niveau cardiaque, l’entraînement sportif ou la pratique régulière d’une activité physique peut induire un remodelage du myocarde, qui va augmenter le volume d’éjection systolique, augmentant le débit cardiaque maximal (Stratton et al. 1994). Associé au remodelage du cœur, le remodelage des vaisseaux sanguins va également contribuer à l’augmentation du flux sanguin jusqu’aux muscles actifs. En effet, l’entraînement est notamment associé à l’augmentation du diamètre des vaisseaux sanguins. Ces ajustements artériels sont localisés sur le membre sollicité dans le cadre de la pratique, comme montré dans l’étude de Huonker et collaborateurs (2003) qui ont mis en évidence une augmentation du diamètre de l’artère subclavière du côté dominant chez les tennismen (c’est-à-dire du côté utilisé pour tenir la raquette), et de l’artère fémorale chez les cyclistes (*Figure 17*). À cela, est associée une plus grande capacité de vasodilatation à l’exercice (Sinoway et al. 1986).

À proximité du muscle, d’autres adaptations vont être permises. L’épaisseur de la paroi artérielle peut être diminuée et ne concerne pas uniquement les artères des membres sollicités dans la pratique, puisque l’épaisseur de la paroi de la carotide peut également être modifiée par le cyclisme, suggérant alors que cette pratique à dominante aérobie permet des adaptations hémodynamiques globales (et non uniquement au regard des muscles majoritairement impliqués dans la pratique) (Thijssen et al. 2013).

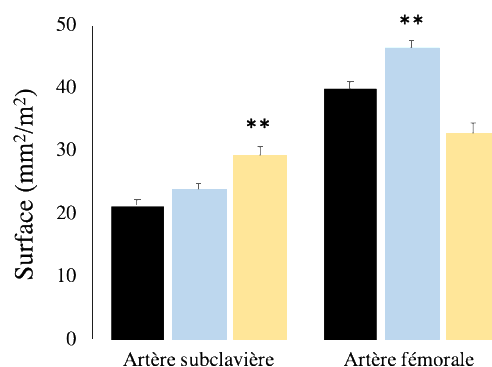


Figure 17 Surface de section des artères subclavière et fémorale (côté dominant) rapportée à la surface du corps chez des sujets non-sportifs ■, des cyclistes ■ et des tennismen ■. Moyenne ± ES. Différence significative par rapport aux non-sportifs : ** P<0,001. (Résultats tirés de l’étude de Huonker et al. 2003).

En conséquence, lors de l’exercice, la distribution du flux sanguin à l’exercice vers les territoires actifs sera plus homogène (Kalliokoski et al. 2001), tandis que la surface occupée par les artérioles sur le muscle peut être augmentée (Laughlin et al. 2006). Ces mécanismes contribueront à mieux faire circuler l’oxygène et le diffuser aux muscles, favorisant alors la contribution aérobie à l’exercice.

La modification des réponses hémodynamiques et métaboliques chez les sportifs permet donc d’une part d’augmenter l’apport en O₂, et d’autre part de favoriser l’utilisation de l’O₂ par le muscle. Ces adaptations permettront de mieux satisfaire les besoins musculaires en O₂ (Grey et al. 2015). Le meilleur équilibre entre les besoins et l’utilisation de l’O₂ pourra se traduire notamment par une augmentation de l’efficacité musculaire (Coyle et al. 1992) et/ou par une accélération de la cinétique d’adaptation de $\dot{V}O_2$ (Murias et al. 2016).

3. Deux exemples de pratiques sportives aux modalités d’entraînement différentes

Pour illustrer de manière plus concrète les différents effets permis par la pratique sportive, nous nous proposons de nous intéresser à deux pratiques aux modalités d’entraînement différentes. D’une part, au judo qui est associée à un renforcement spécifique des muscles du tronc, et d’autre part au cyclisme, qui sollicite de manière intensive le métabolisme aérobie.

3.1 *Caractéristiques des judokas*

Étant donné leurs implications dans la pratique du judo à travers les actions faites pour projeter l’adversaire et le maintenir au sol, tout en maintenant son propre équilibre, il est bien reconnu que les muscles du tronc des judokas sont forts, puissants et endurants (Franchini et al. 2011). Les muscles extenseurs et fléchisseurs du tronc des judokas sont même plus forts et plus endurants que ceux de sujets pratiquants une activité d’endurance, tels que les cyclistes (Kort & Hendriks 1992) (*Figure 18*). Du fait de ses modalités de pratique, le judo est inévitablement à associer au *core training*, et par conséquent, les pratiquants présentent une bonne aptitude à gérer les perturbations pour maintenir une position d’équilibre (Barbado et al. 2016). Ainsi, le renforcement des muscles du tronc et du contrôle lombo-pelvien peut en partie expliquer la faible prévalence de lombalgie chez les judokas, par rapport à une population non-judokate du même âge (Okada et al. 2007).

Lors des combats, les judokas sont soumis à des efforts de courtes durées et de hautes intensités (Franchini et al. 2013) engendrant une sollicitation anaérobie. Cela est associé à une

contribution aérobie puisqu’un combat peut durer jusqu’à huit minutes. D’autre part, l’implication de la filière aérobie va également être primordiale pour rendre les phases de récupération les plus efficaces possible, notamment pour la reconstitution des réserves en phosphocréatine (Franchini et al. 2011). Ainsi, les judokas sont caractérisés par des hauts niveaux de $\dot{V}O_{2max}$ par rapport à la population moyenne, mais ces valeurs restent en dessous de celles d’athlètes pratiquant le cyclisme (Callister et al. 1991; Hug et al. 2003) (*Figure 18*).

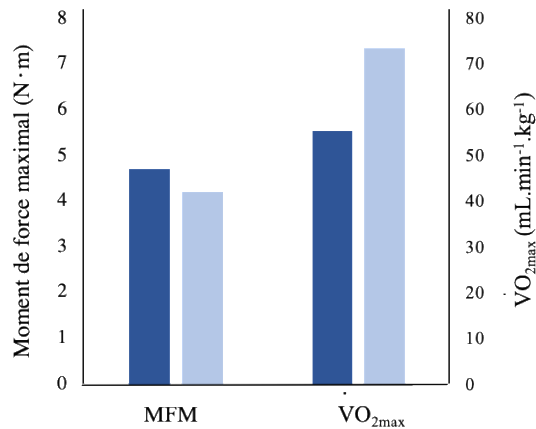


Figure 18 Moment de force développé lors d’une extension du tronc maximale (MFM) et consommation maximale en oxygène ($\dot{V}O_{2max}$) chez des judokas ■ et des cyclistes ■. (Données tirées de Kort & Hendriks 1992 ; Hug et al. 2003 ; et Callister et al. 1991. Dans chaque étude, les sujets sont des hommes dont la moyenne d’âge se situe entre 23 et 25 ans).

L’impact de la pratique sur les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux à l’exercice chez les judokas n’a jamais été rapporté, bien que ces réponses pourraient vraisemblablement être modifiées au vu des modalités de pratique associées au judo.

3.2 Caractéristiques des cyclistes

Contrairement au judo, la pratique du cyclisme ne nécessite pas une implication intensive et dynamique des muscles du tronc puisque ces derniers agissent en tant que simples stabilisateurs du rachis. D’autre part, la pratique du cyclisme est associée à une très forte sollicitation aérobie (Mujika & Padilla 2001). Par conséquent, les cyclistes sont caractérisés par de haut niveau de $\dot{V}O_{2max}$ traduisant une haute aptitude aérobie générale (*Figure 18*) (Hug et al. 2003).

Comme mentionné précédemment, les cyclistes professionnels présentent un remodelage vasculaire qui n’est pas spécifique aux membres inférieurs (Thijssen et al. 2013) et qui est accompagné d’un remodelage cardiaque (Abergel et al. 2004). Cela laisse à supposer que le flux sanguin pourrait être amélioré chez les cyclistes quel que soit le groupe musculaire

sollicité. On observe également chez ces athlètes un niveau d’efficacité de pédalage qui dépasse celle des non-athlètes qui serait permis par la combinaison de deux phénomènes : d’une part le développement d’habiletés motrices, et d’autre part la modification des capacités oxydatives musculaires (Psilander et al. 2015; Coyle et al. 1992). Aussi, la cinétique d’adaptation de $\dot{V}O_2$ est accélérée à l’exercice, non seulement lors d’une tâche de pédalage, mais aussi lors d’une tâche de course (Caputo & Denadai 2004), ce qui corrobore l’idée que les effets de l’entraînement au cyclisme sur les réponses aérobies à l’exercice ne sont pas uniquement dus à la mise en place de stratégies motrices.

Puisque le cyclisme permet un remodelage vasculaire, cardiaque, et accélère les réponses métaboliques à l’exercice, même hors des tâches de pédalage, il semblerait que cette pratique permette des adaptations des réponses aérobies qui peuvent être transférées sur différents exercices. Il est néanmoins aujourd’hui impossible d’affirmer que la pratique du cyclisme suffise à modifier les réponses aérobies des muscles paravertébraux.

La pratique d’une activité sportive permet un ensemble d’adaptations qui améliorent les réponses métaboliques et/ou hémodynamiques à l’exercice à un niveau local, c’est-à-dire au regard du groupe musculaire sollicité de manière prépondérante dans la pratique, ainsi qu’à un niveau plus global. La nature des adaptations dépend des modalités de pratique. Cela dit, l’influence de la pratique sportive sur le métabolisme aérobie des muscles paravertébraux à l’exercice est aujourd’hui méconnue.

Au vu des sollicitations intensives des muscles paravertébraux dans certaines pratiques (telles que le judo), et du haut niveau de capacité aérobie qui caractérisent certains athlètes (tels que les cyclistes), il semble pertinent de se demander comment les réponses du métabolisme des muscles paravertébraux pourraient être influencées par telle ou telle pratique.

II) La prise en charge du lombalgique chronique par l’activité physique

1. Les objectifs de prise en charge

À travers le traitement de la lombalgie chronique, les professionnels de la santé recherchent non seulement à limiter les sensations de douleur, mais aussi à améliorer les facteurs physiques, psychologiques et fonctionnels. À travers ces améliorations, l’objectif à plus long terme est d’améliorer la qualité de vie et permettre la reprise des activités professionnelles et quotidiennes (Agence nationale d’accréditation et d’évaluation en santé (France) 2000). Comme mentionné précédemment dans cette revue de la littérature, les traitements médicaux peuvent avoir de bons effets sur les douleurs, mais les effets secondaires ne sont pas négligeables et ils ne représentent pas une solution envisageable sur le long terme, tandis que les traitements actifs, notamment ceux consistant en une prise en charge des patients par l’activité physique sont considérés comme les plus efficaces (van Tulder et al. 2000).

En 2017, l’Assurance Maladie a initié une campagne pour la prévention de la lombalgie, avec comme slogan « Mal de dos ? Le bon traitement, c’est le mouvement » (*Figure 19*). Le but de cette campagne est de contourner l’idée encore trop répandue que l’arrêt des activités physiques usuelles est une solution pour lutter contre les douleurs lombaires de manière durable.



Figure 19 Affiche de la campagne menée par l’Assurance Maladie pour la sensibilisation à la lombalgie.

2. Les effets d’une prise en charge par l’activité physique

Les questionnements quant à la pertinence des programmes d’activités physiques pour la réhabilitation des lombalgiques ont débuté dans les années 1980 (Jackson & Brown 1983). Tout comme chez les sujets sains, la pratique d’activités physiques chez le lombalgique chronique permet de nombreux bénéfices. Searle et collaborateurs (2015) ont publié une méta-analyse dont les résultats sont presque unanimes. Parmi les trente-neuf études évaluant les effets d’un traitement basé sur la pratique d’exercices physiques, trente mettaient en avant les effets positifs de la pratique d’exercices. Les études qui n’ont pas témoigné en faveur de l’exercice physique ont comparés différents types de traitements, et dans certains cas, l’autre modalité de prise en charge était également (mais dans une moindre mesure) composée d’exercices physiques, ou au moins d’une incitation à la pratique physique.

En plus des sensations de douleur diminuées, la prise en charge par l’activité physique permet l’augmentation de la force et de l’endurance musculaire (Handa et al. 2000; Adegoke & Babatunde 2007) associée à une diminution de l’atrophie musculaire (Kim et al. 2014). Aussi, elle permet une amélioration de la souplesse (Kumar et al. 2015), des capacités fonctionnelles (Günay et al. 2014; van der Velde & Mierau 2000) et des facteurs psychosociaux (Bolarinde et al. 2017) (*Figure 20*).

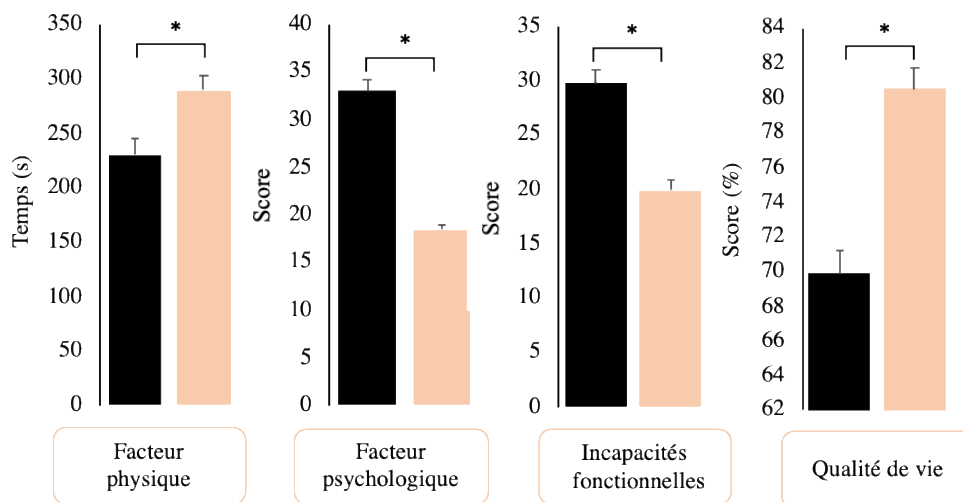


Figure 20 Effets de la pratique d'exercices physiques sur les facteurs physique (l'augmentation du temps témoigne de la moindre fatigabilité musculaire à l'exercice), psychologique (la diminution du score témoigne d'une diminution de la kinésiophobie), les capacités fonctionnelles (la diminution du score témoigne d'une diminution du niveau d'incapacités) et la qualité de vie (l'augmentation du score témoigne d'une meilleure qualité de vie). (■ avant et ■ après le programme ; Différence significative : * $P < 0,05$). (Données tirées de Bolarinde et al. 2017 ; Handa et al. 2000 ; Adegoke & Babatunde 2007 et van der Velde & Mierau 2000).

Concernant l’aptitude aérobie, van der Velde & Mierau (2000) ont rapporté que six semaines de pratique d’activités physiques permettaient, en association avec l’amélioration des sensations de douleur et des capacités fonctionnelles, d’augmenter $\dot{V}O_{2max}$, et que ces valeurs post-entraînement pouvaient même surpasser celles de sujets non-lombalgiques.

L’ensemble de ces améliorations relatives aux facteurs physiques et psychologiques a déjà été associé par conséquent, à une diminution des frais de santé (diminution des visites chez le kinésithérapeute et diminution des recours aux antidouleurs) et à une amélioration du statut professionnel (Sculco et al. 2001) (*Figure 21*).

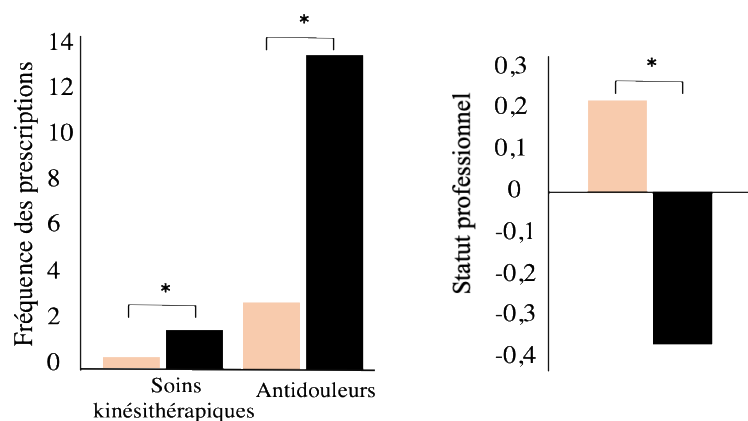


Figure 21 Fréquence des prescriptions médicales et évolution du statut professionnel à 30 mois chez des lombalgiques chroniques ayant adhéré à une pratique d'exercices régulière ■ et chez des lombalgiques chroniques contrôles ■. Différence significative : * P<0,05. (D'après les données de Sculco et al. 2001).

3. Les modalités d'exercice pour le traitement de la lombalgie

La majorité des chercheurs qui a évalué les effets de l'exercice chez les lombalgiques a proposé des programmes combinant des exercices aérobies et des exercices de renforcement musculaire (Koldaş Doğan et al. 2008), ou basés sur des exercices qui permettent à la fois la sollicitation du métabolisme aérobie et le renforcement (Frost et al. 1998). Ce type de programme a déjà montré qu'il permettait une amélioration des facteurs physiques, psychologiques et des capacités fonctionnelles, mais ces protocoles d'exercices ne nous permettent pas de déterminer quel type d'entraînement permet d'apporter le plus de bénéfices, et encore moins quels sont les effets de tel ou tel entraînement. Mettre en lumière quel type d'entraînement permet quelles adaptations chez les lombalgiques chroniques semble toutefois nécessaire pour optimiser les prises en charge.

3.1 Exercices de renforcement des muscles du tronc

Les prises en charge par l’activité physique, basées sur des exercices de renforcement musculaire, seraient les plus efficaces pour le reconditionnement à l’effort des lombalgiques chroniques. Les programmes d’exercices sollicitant le corps dans sa globalité permettraient les meilleurs résultats (Searle et al. 2015).

En même temps qu’il s’est développé auprès du grand public et des sportifs, le *core training*, qui renforce spécifiquement les muscles lombo-pelviens, s’est également répandu pour la rééducation du lombalgique chronique, afin de renforcer les muscles du tronc, développer la coordination et la stabilisation du rachis. Ces exercices étaient largement proposés aux patients lors de la dernière décennie sous forme d’exercices de Pilâtes (Latey 2002). Ces exercices ont déjà été associés à une amélioration des capacités fonctionnelles, de l’endurance musculaire, de l’extensibilité musculo-tendineuse et une diminution des sensations de douleur (Kofotolis & Kellis 2006; Shamsi et al. 2017). D’autre part, ils permettent également de modifier les patterns de recrutement musculaire, vers un pattern plus proche de celui des sujets sains et améliorent le contrôle postural (Tsao & Hodges 2008; Knox et al. 2017). L’amélioration du ratio flexion/relaxation est toutefois équivoque. D’après Watson et collaborateurs (1997) son évolution ne dépendrait pas uniquement de facteurs physiques. Son amélioration nécessiterait en parallèle une prise en charge psychologique pour affranchir les sujets des contraintes liées à la kinésiophobie.

Les programmes d’activités physiques basés sur le renforcement des muscles du tronc nécessitent néanmoins un encadrement des patients afin de veiller à la bonne exécution des mouvements par les patients. En effet, tandis que ces types de programmes ont déjà montré leurs effets positifs lorsque les exercices sont encadrés (Hwangbo et al. 2015), il a aussi été rapporté qu’effectués à domicile et en autonomie, ils pouvaient détériorer la qualité de vie des patients en augmentant les sensations de douleur et le niveau d’incapacité (Hurwitz et al. 2005).

3.2 Entraînement spécifique en aérobic

Les entraînements en aérobic sont rarement proposés en tant qu’unique prise en charge aux lombalgiques chroniques. C’est toutefois ce qu’ont mis en place Sculco et collaborateurs auprès de 35 patients en 2001. Cette prise en charge a permis une amélioration des facteurs psychologiques et sur le long terme, une reprise de l’activité professionnelle et une diminution des recours aux soins médicaux. Plus tard, d’autres études ont rapporté que ce type

d’entraînement permettait aussi une amélioration des capacités fonctionnelles, de l’extensibilité musculo-tendineuse, et des sensations de douleur (Oldervoll et al. 2001; Murtezani et al. 2011). Tandis que certains auteurs encouragent à mettre en place davantage d’exercices à dominante aérobie dans les prises en charge, d’autres suggèrent que les modalités de pratique devraient avant tout dépendre des envies des patients (Shnayderman & Katz-Leurer 2013).

Les travaux menés par Hoffman et collaborateurs (2005) ont même permis de mettre en évidence qu’effectuer un unique exercice aérobie pouvait avoir un effet analgésique, puisque dans cette étude, les sensations de douleur, associées à un même stimulus douloureux, étaient moins importantes après l’exécution d’un exercice aérobie chez des lombalgiques chroniques.

Toutefois, la pratique d’exercices aérobies en complément de la physiothérapie traditionnelle (ultrasons, mobilisation passive, renforcement des muscles du tronc) ne permettrait pas d’augmenter les bénéfices à long terme sur les sensations de douleur et les capacités fonctionnelles, malgré des effets bénéfiques sur l’endurance musculaire et $\dot{V}O_{2max}$ (Chan et al. 2011). Cela suggère que l’amélioration de l’aptitude aérobie maximale n’est pas liée à l’amélioration des symptômes.

La pratique d’une activité physique chez les sujets sains peut être associée à l’accélération des cinétiques d’adaptations et à la diminution du coût énergétique à l’exercice. Curieusement, ces mécanismes n’ont jamais été étudiés chez les lombalgiques chroniques lors d’un exercice sollicitant spécifiquement les muscles. Ils seraient pourtant un bon reflet de la qualité des réponses aérobies, dont l’amélioration pourrait être associée à la réhabilitation des lombalgiques chroniques. Les bénéfices associés à la pratique d’exercice sur ses réponses devraient être davantage considérés.

III) Les programmes de restauration fonctionnelle

1. Objectifs et modalités de prise en charge

Le concept de restauration fonctionnelle a été développé par Mayer & Gatchell en 1988 et s’est répandu dans les années 1990 à travers le monde pour la prise en charge des patients souffrant de lombalgie chronique. Les programmes de restauration fonctionnelle consistent à prendre en charge le patient sous une approche multidimensionnelle, avec comme composante principale l’exercice physique. Ce type de prise en charge serait plus efficace que les soins traditionnels et que les traitements par l’activité physique uniquement (Kamper et al. 2015). Différents principes composent ces prises en charge. Basé sur le modèle biopsychosocial de Waddell (1987), la première caractéristique du programme est sa multidisciplinarité (*Figure 22*). Plusieurs professionnels de la santé agissent en synergie pour une prise en charge physique, psychologique, et comportementale du patient.

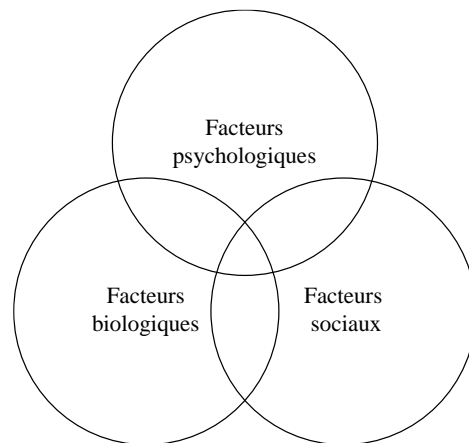


Figure 22 Résumé du modèle biopsychosocial pour la prise en charge des patients lombalgiques chroniques.

Bien que la douleur soit le premier symptôme associé à la lombalgie, celui-ci n’est pas systématiquement prédictif des incapacités fonctionnelles (van Abbema et al. 2011) ou de la reprise de l’activité professionnelle (Véron et al. 2008). C’est pourquoi ces programmes ne visent pas en premier lieu le traitement de la douleur. L’objectif premier de ce type de prise en charge est la restauration fonctionnelle du rachis à travers deux composantes. D’une part, les programmes visent à une prise en charge physique notamment grâce à la pratique d’exercices physiques, proposés sous différentes modalités. D’autre part, ces programmes visent à un apprentissage intellectuel et comportemental des patients afin de leur permettre de comprendre les mécanismes anatomiques impliqués dans leur lombalgie, et de quelle manière il est possible

de limiter les traumatismes quotidiennement infligés au rachis. Ce type de programme basé sur la seule prise en charge comportementale (« École du dos ») peut permettre d’ailleurs, à lui seul, des bénéfices à court et long termes (Tavafian et al. 2008).

Lors d’un programme de restauration fonctionnelle, le patient est acteur de la prise en charge afin que le programme soit bénéfique pendant le séjour, mais aussi après le retour à domicile. Les groupes de patients sont restreints de manière à individualiser la prise en charge et optimiser les bénéfices pour le patient (quatre à huit individus). Cet aspect est primordial étant donné l’hétérogénéité dans les profils des patients (étiologie, symptômes, impact de la pathologie sur le mode de vie). Ces programmes s’étendent de trois à six semaines. Les programmes d’activités physiques sont généralement composés de séances de renforcement musculaire (au poids du corps, avec du petit matériel de gymnastique, ou sur des machines à charge), d’exercices d’endurance sur ergocycle, d’étirements, de renforcement musculaire à partir d’exercices fonctionnels (tel que le soulevé de charge), de séances de balnéothérapie et d’autres activités physiques adaptées.

2. Les effets de la prise en charge pluridisciplinaire pour la restauration fonctionnelle du rachis

2.1 *Facteurs physiques, psychologiques et fonctionnels*

La littérature rapporte largement les effets bénéfiques d’une telle période de restauration fonctionnelle, par cette approche multidisciplinaire (*Tableau 6*). Bien que le traitement de la douleur ne soit pas le premier objectif de ce type de prise en charge, les programmes de restauration fonctionnelle peuvent être associés à une diminution des sensations de douleur (Verfaille et al. 2005; Véron et al. 2008; Poulain et al. 2010). L’amélioration de la force et de l’endurance musculaire est également souvent rapportée dans la littérature, tout comme celle des scores relatifs aux capacités fonctionnelles, à l’extensibilité musculo-tendineuse, et aux facteurs psychologiques tels que l’anxiété, la dépression, et les croyances et les peurs liées à la lombalgie (Kamper et al. 2015).

Il semble aujourd’hui primordial de traiter la lombalgie en prenant en considération toutes les altérations qui la caractérisent. En ce sens, l’association de praticiens spécialistes de la médecine, de la kinésithérapie, de l’ergothérapie, des activités physiques adaptées, et de la psychologie semble être le meilleur moyen de prendre en charge les personnes souffrant de lombalgie chronique.

Tableau 6 Effets d’une période de restauration fonctionnelle du rachis chez des patients lombalgiques chroniques.

	Population	Durée du programme	Effets à la fin du programme	Effets à long terme
Beaudreuil et al. 2010	39 patients	5 semaines 5j/semaine 5h/jour		T _{3mois} et T _{6mois} : Pas d'évolution de la douleur, de l'extensibilité et de l'endurance musculaire. T _{12mois} : Amélioration mitigée des capacités fonctionnelles. Reprise de l'activité professionnelle pour 64%, avec une adaptation ou un changement du poste occupé dans plus de la moitié des cas.
Bendix et al. 1995	40 patients			T _{4mois} : Diminution des sensations de douleur, amélioration des capacités fonctionnelles. Reprise d'une activité physique quotidienne pour 80%. Reprise de l'activité professionnelle (ou apte à reprendre) pour 75%.
Bendix et al. 1998b	90 patients	3 semaines 5j /semaine		T _{24mois} : Meilleure aptitude au travail, augmentation des capacités fonctionnelles, diminution des recours aux soins médicaux.
Bendix et al. 1998a	83 patients	8 h/jour		T _{60mois} : Augmentation de la pratique d'activités sportives. Meilleure aptitude au travail, moins de recours aux soins médicaux.
Bendix et al. 2000	48 patients			T _{12 mois} : Meilleure aptitude au travail , diminution de la pratique d'activités quotidiennes.
Bontoux et al. 2004	87 patients (T _{12mois} : n=83)	5 semaines 6h/jour	Amélioration de la fonctionnalité, endurance, puissance, extensibilité musculo-tendineuse, facteurs psychologiques	T _{12mois} : Maintien des bénéfices. Reprise de l'activité professionnelle pour 74%. (Action ergonomique : 87% de reprise – Pas d'action ergonomique : 55% de reprise).
Caby et al. 2016	144 patients (T _{12mois} : n=31)	5 semaines 5j/semaine 6h/jour	Diminution des sensations de douleur, amélioration de la flexibilité musculo-tendineuse, de la force musculaire et des capacités fonctionnelles	T _{12mois} : Maintien des bénéfices. Reprise de l'activité professionnelle pour 81% (24% avec aménagement, 57% sans aménagement).
Havet et al. 2016	79 patients	3 semaines	Amélioration de la souplesse, des douleurs, de l'endurance musculaire, des facteurs psychologiques	T _{24-120mois} : Reprise de l'activité professionnelle pour 81%, d'une activité de loisirs pour 75% (activité sportive, jardinage, bricolage).
Henchoz et al. 2010	56 patients (T _{3mois, 6mois, 12 mois} : n=40)	3 semaines 5j/semaine 5-7h/jour	Amélioration des capacités fonctionnelles	Reprise de l'activité professionnelle pour 50% à T _{6mois} , 55% à T _{9mois} , 62,5% à T _{12mois} . T _{3mois-6mois} : amélioration des facteurs physiques par rapport aux évaluations préprogramme. T _{12mois} : seuls les bénéfices pour l'extensibilité sont maintenus.
Jousset et al. 2004	42 patients	5 semaines 5j/semaines 6h/jour		T _{6mois} : diminution des arrêts-maladie, des sensations de douleur, amélioration de la flexibilité musculo-tendineuse, de l'endurance musculaire, de la fonctionnalité, des facteurs psychosociaux.

	Population	Durée du programme	Effets à la fin du programme	Effets à long terme
Mayer et al. 1987	116 patients (T _{3mois} : n=81 T _{2ans} : n=100)	3 semaines		T _{3mois} : amélioration de la force musculaire et de l'extensibilité. T _{24mois} : Reprise de l'activité professionnelle pour 87%, 5x moins de visites médicales par rapport au groupe contrôle
Olivier et al. 2007	30 patients	4 semaines 5j/semaine	Amélioration de la douleur, du score de Dallas, de la souplesse, des performances musculaires	T _{3mois} : Maintien des bénéfices sur la souplesse, sur les facteurs psychologiques. Amélioration des performances musculaires par rapport aux évaluations post -programme.
Poiraud et al. 1999	35 patients	5 semaines 7h/jour, 5j/semaines	Pas de modification des douleurs, amélioration de l'extensibilité musculaire, des capacités fonctionnelles, des facteurs psychologiques	T _{12mois} : Reprise de l'activité professionnelle pour 66%.
Poulain et al. 2010	105 patients	4 semaines 6h/jours 5j/semaine	Amélioration des douleurs à la fin du séjour, des facteurs psychologiques, de la qualité de vie, des capacités fonctionnelles, et des croyances et peurs par rapport à la pathologie	T _{6mois} : Reprise de l'activité professionnelle pour 39%, des activités sportives pour 90% T _{12mois} : Pas de maintien quant à l'amélioration des sensations de douleur. Maintien des bénéfices psychologiques, sur la qualité de vie, les capacités fonctionnelles. Reprise de l'activité professionnelle pour 55%, des activités sportives pour 69%.
Strand et al. 2001	81 patients	4 semaines, 5j/semaine, 6h/jour		T _{12mois} : Reprise de l'activité professionnelle pour 47%. Reprise de l'activité professionnelle associée à l'amélioration des capacités fonctionnelles.
Verfaillie et al. 2005	34 patients (T _{11mois} : n=29 T _{48 mois} : n=26)	4 semaines 6h/jour, 5j/semaine	Amélioration de la souplesse et des performance musculaire, diminution des sensations de douleur	T _{12mois} : Pas de maintien pour l'amélioration des sensations de douleur. Reprise des activités physiques pour 81%. T _{48mois} : Pas de maintien pour l'amélioration de l'endurance musculaire. Reprise des activités physique pour 65%. Pas de lien entre la reprise de l'activité professionnelle et les activités physiques.
Véron et al. 2008	303 patients (T _{1mois} : n=297 T _{3mois} : n=277 T _{6mois} : n=260 T _{12mois} : n=220)	5 semaines 6h/jour, 5j/semaine	Amélioration du score à l'EVA, de la souplesse, de $\dot{V}O_2$ max, de l' endurance musculaire, des capacités fonctionnelles et du versant psychologique	Reprise de l'activité professionnelle pour 52% des patients à T _{1mois} , 59% à T _{3mois} , 57% à T _{6mois} , 60% à T _{12mois} .
Wormgoor et al. 2008	94 patients	3 semaines, 5j/semaine 6-8h/jour	Augmentation de la $\dot{V}O_2$ max, des capacités fonctionnelles, des facteurs psychosociaux, diminution des sensations de douleur	T _{6mois} : Maintien de l'amélioration de la capacité aérobie, mais celle-ci n'est pas liée aux autres améliorations relatives aux capacités fonctionnelles, psychosociales ou à la reprise de l'activité professionnelle.

2.2 Réponses du métabolisme aérobie à l'exercice

Certains auteurs se sont intéressés à évaluer les effets d'un programme de restauration fonctionnelle du rachis sur les niveaux de $\dot{V}O_{2max}$. Ceux-ci peuvent ainsi être augmentés (Véron et al. 2008; Wormgoor et al. 2008; Doury-Panchout et al. 2014). Cependant, le niveau de $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas souvent mesuré lors de la prise en charge du lombalgique chronique. Cela peut se justifier par le fait que cette mesure nécessite du matériel spécifique et qu'un effort maximal est difficilement atteignable chez les lombalgiques chroniques, à cause des comportements kinésiophobiques (Thomas et al. 2010) et de la faible tolérance à l'exercice (Wittink et al. 2000). D'autre part, comme mentionné dans la deuxième partie de cette thèse, le niveau de $\dot{V}O_{2max}$ n'est pas associé aux capacités fonctionnelles (Wormgoor et al. 2008) et dans les activités quotidiennes, $\dot{V}O_{2max}$ est rarement atteint. Son augmentation ne représente donc pas un objectif en tant que tel dans la prise en charge des patients.

Les réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice sous-maximal ont été peu rapportées dans la littérature, et encore moins pendant un séjour de restauration fonctionnelle. À notre connaissance, une seule étude s'est intéressée aux réponses hémodynamiques et métaboliques lors d'un exercice sollicitant les muscles du tronc, avant et après un séjour. Dans cette étude, Olivier et collaborateurs (2013) ont remarqué que l'augmentation des capacités fonctionnelles des sujets en fin de séjour était associée à une augmentation du volume sanguin musculaire à l'exercice et à une augmentation de l'indice OXY, qui selon les auteurs serait attribué à une augmentation de l'apport en O_2 pendant l'exercice. Néanmoins, l'exercice lors duquel les réponses étaient évaluées était un exercice de port de charge. Il est alors difficile de déterminer si la modification des réponses est plutôt attribuée à une modification du pattern de recrutement musculaire (Marras et al. 2001) ou à une modification des réponses aérobie à l'exercice.

3. Effets à long terme d'un programme de restauration fonctionnelle du rachis

La lombalgie chronique est une pathologie qui nécessite un suivi, puisque quatre semaines de réadaptations fonctionnelles ne suffisent pas à restaurer toutes les capacités des sujets, ni à supprimer les sensations de douleur résidant dans le bas du dos. Les mesures relatives aux performances musculaires, à l'extensibilité musculo-tendineuse, aux capacités fonctionnelles, à la douleur, et au versant psychologique doivent être renouvelées *a posteriori*, et complétées par des questionnaires sur la qualité de vie et sur la reprise des activités

quotidiennes, professionnelles, de loisirs, et sportives. Ainsi, instaurer un suivi après la prise en charge permet d’évaluer les effets à long terme du programme sur les capacités et sur la potentielle modification du mode de vie du sujet (récidence ou persistance de la lombalgie, modification de la qualité de la vie, reprise ou non des activités quotidiennes, de loisirs, sportives et professionnelles, adhésion à de nouvelles activités...).

Olivier (2007) et Mayer (1987) et collaborateurs n’ont effectué qu’un suivi à trois mois, mais dans ces études, les résultats aux évaluations ont révélé que l’amélioration des facteurs physiques et fonctionnels était maintenue, voire augmentée trois mois après le retour à domicile. À un an post-programme, les travaux menés par Verfaille et collaborateurs (2005) et Poulain et collaborateurs (2010), ont révélé le non-maintien des améliorations liées aux sensations de douleur, mais une augmentation de la souplesse et de l’endurance musculaire. À quarante-huit mois, les sensations de douleur étaient à nouveau diminuées dans l’étude menée par Verfaille et collaborateurs (2005). Dans les travaux menés par Ane et Tom Bendix et collaborateurs (1995, 1998a, b, 2000), le suivi longitudinal des patients effectué sur cinq ans n’attestait pas non plus toujours du maintien des bénéfices (*Tableau 6*).

Les bénéfices ne sont pas toujours maintenus à long terme, et les facteurs influents ne sont aujourd’hui pas clairement définis. Des auteurs ont suggéré que le maintien des bénéfices après le programme de restauration fonctionnelle serait dépendant du niveau d’activité physique dans la vie quotidienne (Olivier et al. 2007; Caby et al. 2016).

4. Reprise des activités professionnelles et quotidiennes

Étant donné l’impact socioéconomique des arrêts de travail liés à la lombalgie chronique, la reprise de l’activité professionnelle est aussi une priorité dans le traitement des patients. La reprise de l’activité professionnelle à un an est de 50 à 90% en fonction des études (*Tableau 6*). Il existe donc une grande hétérogénéité quant à cet aspect et un grand intérêt est aujourd’hui porté sur les facteurs prédictifs de la reprise de l’activité professionnelle. Leur détermination pourrait permettre de mieux diriger la prise en charge pour favoriser la réhabilitation professionnelle. Même si les séjours de restauration fonctionnelle pour les lombalgiques chroniques sont coûteux, ils représentent un avantage socioéconomique considérable grâce à la diminution des arrêts de travail et de celle des frais de santé post-hospitalisation (Bendix et al. 1995).

Les suivis des patients dans le cadre d’études longitudinales ont permis de mettre en évidence que la diminution du niveau d’incapacité, de l’anxiété et de la dépression, et des

sensations de douleur seraient des facteurs favorisant la reprise de l’activité professionnelle (Véron et al. 2008; Havet et al. 2016).

Outre les bénéfices associés au programme de restauration fonctionnelle, d’autres facteurs individuels influencent la reprise ou non des activités. Par exemple, les personnes qui pratiquaient un sport avant d’intégrer un programme de restauration fonctionnel auraient plus de chance de reprendre leur activité professionnelle (Poulain et al. 2010). Aussi, les personnes dont la lombalgie s’est déclarée suite à un accident de travail, seraient moins enclines à reprendre leur activité professionnelle après le programme. Cela semble se justifier par le processus de victimisation chez ces patients (Poiraudeau et al. 2007). Dans ce cas, un aménagement ou une modification du poste semble être primordial pour la réhabilitation professionnelle des patients. L’importance de tels aménagements du poste de travail a déjà été montrée à travers les résultats de Bontoux et collaborateurs (2004).

Les différents éléments mentionnés mettent bien en évidence l’importance du versant psychosocial dans la prise en charge des lombalgies chroniques, notamment pour la réhabilitation professionnelle. Néanmoins les travaux de Havet et collaborateurs (2016) suggèrent que la reprise d’une activité physique de loisir n’est pas liée aux facteurs psychologiques, mais uniquement à la capacité à effectuer des tâches quotidiennes. Ainsi, le versant fonctionnel joue également un rôle fondamental pour la réhabilitation des lombalgies chroniques. Aujourd’hui, la prise en charge des patients nécessite incontestablement une prise en charge pluridisciplinaire.

Le traitement de la lombalgie chronique a évolué au cours des dernières décennies, et on considère aujourd’hui que le meilleur moyen de la soigner est la prise en charge multidisciplinaire des patients, à travers la collaboration d’un panel de professionnels de la santé, autour d’un même enjeu : sortir les patients du cercle du déconditionnement grâce à l’amélioration des facteurs physiques et fonctionnels, et la modification des comportements psycho-sociaux. Toutefois, les facteurs associés à la réhabilitation des individus et à la reprise des activités quotidiennes usuelles ne sont pas déterminés. Jusqu’à aujourd’hui, la qualité des réponses aérobies à l’exercice sous-maximal n’a jamais été envisagé comme potentiel facteur.

CONTRIBUTION PERSONNELLE

PARTIE 2

ORIENTATION DE TRAVAIL

ET OBJECTIFS

I) Contexte

Nous avons montré dans la revue de la littérature que les muscles du tronc interviennent en quasi-permanence pour la mobilisation et la stabilisation du rachis. Les réponses du métabolisme aérobie jouent alors un rôle crucial pour permettre aux muscles paravertébraux de remplir leurs fonctions, puisque c'est la filière aérobie qui permettra de synthétiser l'ATP pendant de longues durées.

Aujourd'hui, il persiste de nombreuses zones d'ombres quant à l'adaptation des réponses aérobies de ces muscles à l'exercice. Les données relatives aux sujets sains sportifs sont inexistantes. Par conséquent, la littérature ne nous permet pas de savoir dans quelle mesure le niveau d'adaptabilité de ces muscles peut être modifié par une pratique physique régulière. La pratique régulière d'exercices physiques est néanmoins déjà associée à des adaptations des réponses hémodynamiques et métaboliques à l'exercice, qui dépendent des modalités de pratique. En effet, les adaptations globales - cardiodynamiques et hémodynamiques - permises par l'entraînement aérobie sont largement décrites dans la littérature. Les effets de l'entraînement sportif en résistance (renforcement des membres inférieurs) et en aérobie (course, cyclisme) sur les réponses du métabolisme aérobie des muscles membres inférieurs, sont également largement décrits. Ainsi, l'exercice physique permet des adaptations centrales et locales.

D'autre part, il n'existe que très peu de données, et aucun consensus, concernant les réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux des patients lombalgiques chroniques, pathologie pouvant être associée à leur dysfonctionnement. Des auteurs ont en effet déjà suggéré que les symptômes pourraient en partie être associés à une altération des réponses hémodynamiques et/ou métaboliques à l'exercice au regard des muscles paravertébraux. Si lors d'un exercice prolongé les réponses hémodynamiques et métaboliques sont altérées, celles-ci pourraient être inadéquates pour satisfaire les besoins musculaire en oxygène. Un apport et/ou une utilisation inappropriée de l'oxygène engendrerait alors une faible contribution aérobie à l'exercice, qui sera compensée par une augmentation de la contribution anaérobie. Cette dernière pourrait être responsable des sensations de douleur et du haut niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux.

II) Problématiques

Dans ce contexte, nous pouvons nous demander si la pratique d'exercices physiques peut améliorer les réponses aérobies des muscles paravertébraux lors d'un exercice prolongé sollicitant spécifiquement les muscles extenseurs du tronc, en optimisant la contribution aérobie pour fournir l'énergie nécessaire à l'exercice. Puisque les adaptations dépendent des modalités de pratique, nous pouvons émettre l'hypothèse que les réponses à l'exercice chez les athlètes diffèrent en fonction de la spécialité sportive (pratique aérobie vs renforcement plus spécifique des muscles du tronc). La première pourrait être associée à de meilleures réponses hémodynamiques, favorisant le transport de l'O₂ jusqu'au muscle, tandis que la deuxième pourrait plutôt être associée à une meilleure efficacité mécanique, permis par la sollicitation des muscles dans le cadre de la pratique sportive.

D'autre part, au vu de l'absence de consensus à ce sujet, nous pouvons nous interroger sur la potentielle altération des réponses du métabolisme aérobie à l'exercice au regard des muscles paravertébraux chez les lombalgiques chroniques. Aussi, nous pouvons nous demander quels effets auraient une période de quatre semaines de restauration fonctionnelle avec l'activité physique comme principale composante, chez les patients. Nous pouvons supposer que la contribution aérobie lors d'un exercice sollicitant spécifiquement les muscles paravertébraux serait altérée chez les lombalgiques. Néanmoins, les programmes de restauration fonctionnelle pourraient permettre d'améliorer ses réponses, ainsi que les sensations de douleur et la fatigabilité à l'exercice.

III) Objectif

L'**objectif principal** de cette thèse était de déterminer la spécificité des réponses du métabolisme aérobie et de l'hémodynamisme au regard des muscles paravertébraux, chez des sujets jeunes, sportifs et en bonne santé, ainsi que chez des patients atteints de lombalgie chronique avant et après une prise en charge dans le cadre d'un programme de restauration fonctionnelle. À travers cet objectif, notre volonté était ainsi d'apporter de nouveaux éléments pour une meilleure compréhension des réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux, et de leur degré d'adaptabilité grâce à la pratique d'exercices physiques. Notre **hypothèse principale** était que la pratique d'activités physiques serait associée à une amélioration des réponses aérobies musculaires à l'exercice, aussi bien chez les sujets jeunes sportifs que chez des patients lombalgiques chroniques.

Pour répondre à cet objectif, ce travail de thèse s'est organisé autour de 4 études. Ainsi, nous avons étudié tout au long de ce travail de thèse les réponses physiologiques des muscles paravertébraux, au cours d'exercices d'extension du tronc. Pour ce faire, nous avons utilisé un dynamomètre isocinétique pour concevoir des exercices standardisés, à des intensités sous-maximales. La durée des exercices était de 5 minutes, pour assurer une implication prépondérante du métabolisme aérobie musculaire dans la dépense énergétique :

- L'**étude 1** et l'**étude 2** s'intéressaient aux réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux, chez des populations jeunes, en bonne santé, et sportives. L'objectif de ces études était d'appréhender le niveau d'adaptabilité des réponses métaboliques et hémodynamiques des muscles paravertébraux, permis par l'entraînement sportif.
- L'**étude 3** et l'**étude 4** s'intéressaient à des patients lombalgiques chroniques. Ces derniers ont été comparés à des sujets sains appariés (étude 3), et nous les avons suivis avant et après un programme de restauration fonctionnelle du rachis (étude 4). L'objectif de ces études était de déterminer les spécificités du métabolisme aérobie musculaire des lombalgiques chroniques, et d'analyser la modification de ses réponses après une période de restauration fonctionnelle du rachis.

PARTIE 3

MATERIELS ET METHODES

Les études ont été réalisées en accord avec les principes éthiques de la déclaration de Helsinki et ses amendements ultérieurs. Le protocole des études cliniques a reçu un avis favorable du comité de protection des personnes de Lille (n° d'enregistrement : 2016 A01151 50). Chaque participant a reçu et signé une lettre d'informations éclairées et un formulaire de consentement avant de débiter le protocole.

I) Participants

Chaque participant devait être âgé entre 18 et 55 ans, affilié à un régime d'assurance sociale, capable de donner un consentement éclairé et avoir un indice de masse corporel inférieur à 35. Chacun devait être volontaire et motivé, pour participer à une ou plusieurs des études.

Les critères de non inclusion étaient l'existence d'une contre-indication à la pratique d'activités physiques, l'existence d'une pathologie cardiaque, respiratoire, métabolique, neurologique, ou douloureuse articulaire (exceptées les lombalgies pour les patients des études 3 et 4), les femmes enceintes ou allaitantes, les personnes en situation d'urgence ainsi que les personnes incapables de donner personnellement leur consentement, dont les personnes majeures sous tutelle. Les participants des études 1, 2 et les sujets contrôles de l'étude 3 n'étaient pas inclus s'ils avaient éprouvé des douleurs dorsales incapacitantes dans l'année écoulée, ou s'il avait déjà souffert de lombalgie chronique.

Pour chaque étude, les participants étaient exclus de l'étude s'ils en manifestaient la volonté.

Au total, 73 participants ont été inclus :

- Pour **l'étude 1**, seize sujets ont été inclus, pratiquant de l'activité physique et sportive de manière structurée et régulière.
- Pour **l'étude 2**, vingt sujets ont été inclus, qui constituaient trois groupes d'hommes : des cyclistes, des judokas, et des sujets non sportifs.
- Pour **l'étude 3**, vingt-huit sujets lombalgiques chroniques, et neuf volontaires sains ont été inclus.
- Pour **l'étude 4**, vingt-trois lombalgiques chroniques qui avaient participé à l'étude 3 et qui avaient accepté d'être réévalué, ont été inclus.

II) Protocole expérimental

1. Plan des études

La visite d'inclusion des sujets s'organisait avant les premières évaluations. Le but de cette visite était de vérifier les critères d'inclusion et de non inclusion des participants, et d'apporter les informations et les explications nécessaires pour une bonne compréhension de l'étude. Ensuite, un entretien clinique était effectué afin de recueillir les données anthropométriques et l'historique médical. Dans le cadre des études 3 et 4, les patients et les volontaires sains effectuaient en plus le test de Sorensen, et remplissaient des questionnaires lors de la visite d'inclusion.

Après avoir effectué la visite d'inclusion, chaque participant a effectué une ou deux visites, pour évaluer la force des muscles extenseurs du tronc, et leurs réponses métaboliques et hémodynamiques lors d'exercices d'extension du tronc (*Figure 23*).

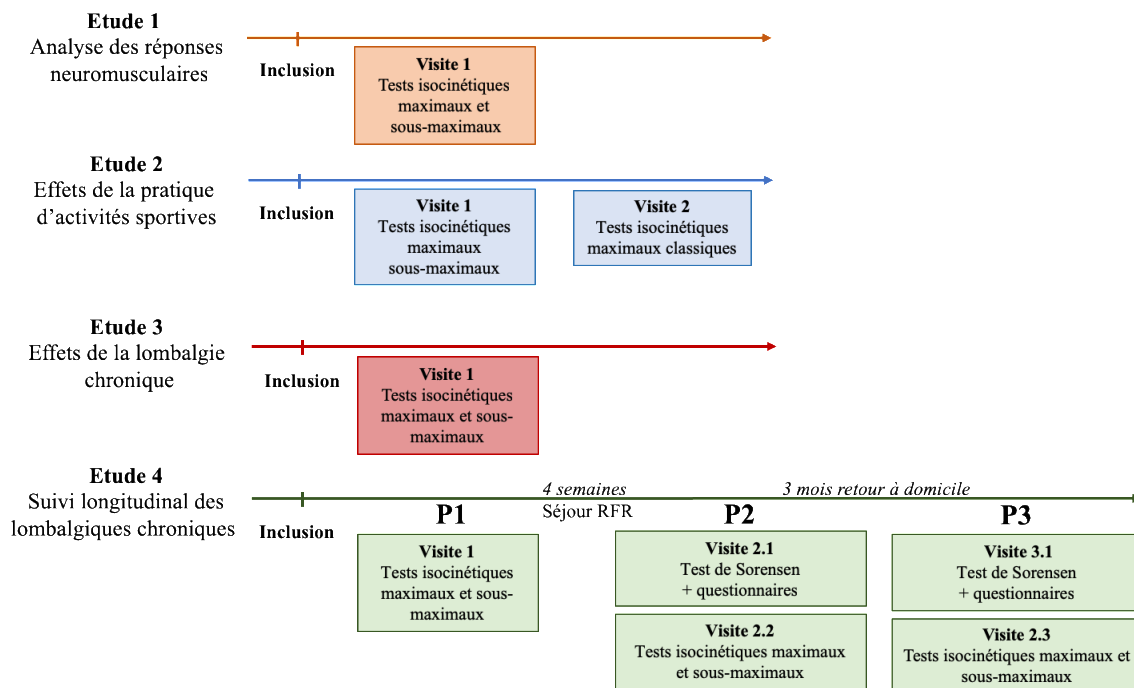


Figure 23 Plan expérimental des études.

Les participants de **l'étude 1** ont effectué une visite. Ils devaient exécuter des exercices isocinétiques en mode arthromoteur :

- Un exercice maximal pour l'évaluation de la force musculaire maximale ;
- Deux exercices sous-maximaux, lors desquels étaient évaluées l'activité neuromusculaire et les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux. Pour ce faire, les participants étaient équipés d'électrodes EMG et d'optodes NIRS avant d'effectuer les exercices (*Tableau 7*).

Les participants de **l'étude 2** ont effectué deux visites. Lors de la première visite, ils devaient exécuter des exercices isocinétiques en mode arthromoteur :

- Un exercice maximal pour l'évaluation de la force musculaire maximale ;
- Deux exercices sous-maximaux, lors desquels étaient évaluées les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux. Pour ce faire les participants étaient équipés d'optodes NIRS et d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires avant d'effectuer les exercices sous-maximaux (*Tableau 7*).

Lors de la seconde visite, les sujets ont à nouveau effectué des exercices isocinétiques pour évaluer la force musculaire maximale en mode isocinétique classique.

Au minimum 48 heures séparaient les deux visites.

Les participants de **l'étude 3** ont effectué une visite. Ils devaient exécuter des exercices isocinétiques en mode arthromoteur :

- Un exercice maximal pour l'évaluation de la force musculaire maximale ;
- Deux exercices sous-maximaux, lors desquels étaient évaluées les réponses du métabolisme aérobie musculaire. Pour ce faire les participants étaient équipés d'optodes NIRS et d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires avant d'effectuer les exercices sous-maximaux (*Tableau 7*).

Les participants de **l'étude 4** ont effectué des évaluations à trois reprises :

- Période 1 (P1) : Évaluation des sujets au cours de la première semaine d'hospitalisation programmée à durée déterminée, dans le cadre d'un séjour de 4 semaines de restauration fonctionnelle.
- Période 2 (P2) : Évaluation des sujets au cours de la dernière semaine d'hospitalisation.
- Période 3 (P3) : Évaluation sur une demi-journée, 3 mois après le retour à domicile

P1 et P2 s'étalaient sur une semaine. En début de semaine, les sujets remplissaient des questionnaires afin d'évaluer le versant socio-psychologique, et effectuaient des tests physiques afin d'évaluer le niveau de fatigabilité des muscles extenseurs du tronc (Test de Sorensen). En fin de semaine, ils devaient exécuter des exercices isocinétiques en mode arthromoteur :

- Un exercice maximal pour l'évaluation de la force musculaire maximale ;
- Deux exercices sous-maximaux, lors desquels étaient évaluées les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux. Pour ce faire les participants étaient équipés d'optodes NIRS et d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires avant d'effectuer les exercices sous-maximaux (*Tableau 7*).

À P3, toutes les évaluations ont été effectuées sur une demi-journée.

Tableau 7 Résumé des tests et outils de mesures utilisés dans chaque étude.

	Test maximaux			Mesures effectuées pendant les tests isocinétiques sous-maximaux			
	Tests isocinétiques classique	Tests isocinétiques arthromoteur	Test de Sorensen	EMG	NIRS	Échanges gazeux	Lactatémie
Étude 1							
Analyse des réponses neuromusculaires		√		√	√		
Étude 2							
Effets de la pratique d'APS	√	√			√	√	
Étude 3							
Effets de lombalgie chronique		√	√		√	√	
Étude 4							
Suivi longitudinal des LC		√	√		√	√	√

(EMG : électromyographie ; NIRS : spectroscopie proche infrarouge ; APS : activités physiques et sportives ; LC : lombalgies chroniques).

2. Tests isocinétiques

Les tests ont été réalisés sur un dynamomètre isocinétique (Con-trex® TP-1000, CMV AG, Suisse) (*Figure 12, page 48*). Cet outil a été choisi puisque l'isocinétisme représente déjà un outil de référence pour l'évaluation de la force, de l'endurance et de la puissance des muscles extenseurs du tronc, et qu'il permet d'organiser de nombreux réglages favorisant la standardisation du mouvement. Un protocole original a été mis en place, afin de solliciter de manière spécifique les muscles paravertébraux à travers des mouvements d'extension du tronc répétés, et de manière prolongée afin de solliciter la filière énergétique aérobie. Les durées, les vitesses et les intensités des exercices étaient standardisées. Les mêmes exercices ont été mis en place dans toutes les études (*Figure 24*).

Avant de débiter chaque séance d'exercices isocinétiques, le système était calibré. Le participant était ensuite installé sur le module tronc en suivant scrupuleusement la notice de l'utilisateur. Il était installé sur les plateformes prévues à cet effet, les chevilles étaient contre la plateforme arrière. Les jambes étaient légèrement pliées, grâce au coussin positionné au niveau de la fosse poplitée. Les jambes étaient fixées par deux autres coussins, l'un au niveau des tibias et l'autre au niveau des cuisses. Les épines iliaques, les vertèbres L5/S1 et la ligne mid-axillaire étaient alignées avec les pointeurs de la machine. Le haut du corps était maintenu à l'aide d'un coussin scapulaire, positionné au niveau de la partie inférieure de la scapula, et d'un autre au niveau de la poitrine, ainsi que d'une ceinture pelvienne. Une fois le sujet installé, le zéro anatomique était déterminé, puis l'amplitude du mouvement était fixée à 70°, d'environ 5° d'extension jusqu'à 65° de flexion du rachis. Pour finir, le poids exercé par le tronc sur la machine, en fonction de la position angulaire, était évalué au cours d'un mouvement passif de flexion/extension, pour corriger les effets de la gravité sur les données obtenues par la suite.

Les exercices étaient réalisés en mode « arthromoteur » (« *continuous passive motion* »). En utilisant ce mode, la machine était motorisée indépendamment des actions du sujet. Seules les extensions du tronc étaient actives, tandis que les phases de flexion étaient passives puisque l'objectif était de focaliser le travail musculaire sur les muscles extenseurs du tronc. Les vitesses choisies étaient communes entre les différents exercices et pour tous les participants. Les vitesses étaient lentes. De cette manière les participants pouvaient aisément maîtriser leur ventilation pendant les exercices, et focaliser leur attention sur la phase d'extension, de manière à ce que les intensités sous-maximales d'exercice soit respectées. La vitesse d'extension (active) était fixée à 60°.s⁻¹ et la flexion (passive) était fixée à 30°.s⁻¹.

**Tests isocinétiques d'extension du tronc
(mode arthromoteur)**

Vitesse extension: 60 °/s

Vitesse flexion: 30 °/s

Amplitude: 70 °

Phase d'échauffement et de familiarisation

Exercice maximal
3 extensions du tronc maximales

Phase de récupération (10 minutes)

Exercice sous-maximal (1/2)
5-min d'extension du tronc (80 N·m)

Phase de récupération (20 minutes)

Exercice sous maximal (2/2)
5-min d'extension du tronc (70%_{max})

Figure 24 Protocole d'exercices isocinétiques en mode arthromoteur.

2.1 Exercice isocinétique maximal (mode arthromoteur) (Études 1, 2, 3 et 4)

Après une période d'échauffement et de familiarisation avec le mode arthromoteur, les participants de chaque étude devaient effectuer 3 extensions maximales du tronc.

Variables mesurées

La meilleure répétition était utilisée pour déterminer le moment de force maximal, indicateur de la force maximale des muscles extenseurs du tronc. À cette valeur était ajoutée un filtre passe bas et un filtre compensation de la gravité, ces filtres permettant respectivement de supprimer les artefacts et l'influence du poids du corps sur les performances. Lors de cette répétition, le travail fourni était aussi relevé, pour déterminer une intensité d'exercice sous-maximale, relative au niveau de force maximale de chaque individu.

2.2 Exercices isocinétiques sous-maximaux (Étude 1, 2, 3, 4)

Au cours des exercices sous-maximaux, les intensités d'exercice étaient représentées par une zone cible matérialisée sur un écran d'ordinateur (Figure 25). Les deux exercices étaient systématiquement proposés dans le même ordre. Après plusieurs mois d'essais et d'ajustements du protocole, les intensités retenues étaient de 80 N·m pour l'exercice à intensité absolue, et 70% du travail développé sur la répétition associée au plus haut moment de force, pour l'exercice à intensité relative (cf. 2.1. Exercice isocinétique maximal (mode arthromoteur)).

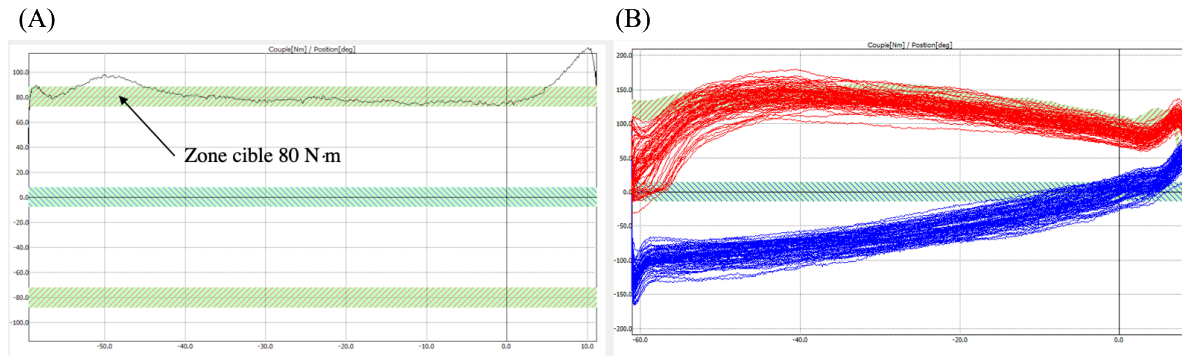


Figure 25 (A) Feedback visuel au cours d'une extension à 80 N·m et (B) figure obtenue après un exercice à 70% max représentant l'ensemble des extensions effectuées (en rouge).

Variables mesurées

Le travail total fourni au cours des extensions du tronc, lors de chaque exercice de 5 minutes, était calculé directement par le dynamomètre isocinétique.

Les sensations de douleur dans le bas du dos étaient évaluées avant et après chaque exercice sous-maximal de 5 minutes, à partir d'une échelle visuelle analogique de la douleur (Hawker et al. 2011). Cette échelle prend la forme d'une règle, dont le recto est présenté au sujet. Le sujet doit positionner un curseur entre les deux extrémités de la règle qui correspondent d'une part à « Pas de douleur » et d'autre part à « Douleur maximale imaginable ». Au verso, la règle est graduée de 0 à 10 cm (« 0 » correspondant à « pas de douleur », « 10 » correspondant à « douleur maximale imaginable »). Puisque nous nous intéressons à la part d'implication des différents groupes musculaires dans l'étude 1, nous avons également évalué les sensations de douleur en fin d'exercice à l'arrière des cuisses, dans le cadre de cette étude.

À la fin de chaque exercice, la perception de l'effort était évaluée à partir de l'échelle de Borg. Elle est numérotée de 6 à 20 (« 7 » correspondant à un effort « très très léger » et « 19 » à un effort « très très dur » (Borg 1982).

Pour analyser les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux et de l'hémodynamisme, l'oxygénation musculaire a été évaluée par l'analyse des signaux récoltés par spectroscopie proche infrarouge. $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, la fréquence respiratoire, et le volume courant ont été mesurés par un analyseur des échanges gazeux pulmonaires, et la fréquence cardiaque par un cardiofréquence mètre. À partir des données respiratoires, l'efficacité mécanique et les cinétiques de $\dot{V}O_2$ ont pu être calculées.

Dans le cadre de l'étude 1, l'implication neuromusculaire a été évaluée par l'analyse des signaux électromyographiques. (Tableau 7, page 96)

2.3 Test isocinétique maximal (mode isocinétique classique) (Étude 2)

Afin d'évaluer la force maximale des muscles extenseurs du tronc à partir d'un protocole couramment utilisé, un autre exercice isocinétique maximal a été mis en place dans le cadre de l'étude 2. Cet exercice consistait à effectuer 3 mouvements de flexion/extension du tronc en mode « isocinétique classique » à $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ (Kort & Hendriks 1992).

Variables mesurées

Le moment de force maximal développé lors de la meilleure répétition était récupéré. À cette valeur était ajoutée un filtre passe bas et un filtre compensation de gravité. Ils permettaient respectivement de supprimer les artefacts et l'influence du poids du tronc sur les performances.

3. Matériels utilisés pour l'évaluation des réponses métaboliques et hémodynamiques

3.1 *La spectroscopie proche infrarouge (Étude 1, 2, 3, 4)*

La spectroscopie du proche infrarouge (NIRS), est une technique de mesure permettant de suivre en continu l'évolution de l'oxygénation et du volume sanguin au niveau musculaire (Ferrari et al. 2004). Cette technique repose sur l'émission d'une lumière à la surface de la peau, au regard du muscle d'intérêt, rendant cette technique non invasive.

Des optodes émettant une lumière dans le spectre du proche infrarouge (de 700 nm à 1000 nm) sont utilisées. Cette fenêtre optique n'est pas choisie au hasard, puisqu'elle correspond à des longueurs d'ondes qui vont pénétrer dans les tissus musculaires sans être absorbées ou diffusées par les tissus biologiques tels que la peau. Au contraire, elles pourront être absorbées par l'hémoglobine (Hb) et la myoglobine (Mb) (Boushel & Piantadosi 2000). Les propriétés d'absorption lumineuse de l'hémoglobine et de la myoglobine dépendent de leur oxygénation. L'Hb-Mb désoxygénée va absorber les lumières de l'ordre de 760 nm, alors que l'Hb-Mb oxygénée va absorber les lumières de l'ordre de 850 nm. Ainsi, la mesure de l'absorption des photons permet d'estimer l'évolution du taux de désoxyhémoglobine et d'oxyhémoglobine.

Au cours de nos expérimentations, deux optodes NIRS (Portamon®, Artinis Medical Systems, BV, Pays Bas) étaient utilisées simultanément (*Figure 26*). Les mesures étaient enregistrées par le logiciel Oxysoft®. Sur ces appareils, les récepteurs de lumière sont positionnés à 3 cm, 3,5 cm et 4 cm de l'émetteur de lumière du proche infrarouge. Les données

analysées dans le cadre de ces travaux de thèse sont celles récoltées par l'émetteur le plus éloigné, puisqu'il permet d'envoyer la lumière le plus en profondeur dans le muscle.

Afin de protéger les optodes de la transpiration et d'éviter ainsi une détérioration du matériel et une altération des données récoltées, les optodes étaient recouvertes de papier film. Elles étaient ensuite positionnées au niveau de la quatrième vertèbre lombaire, à 3 cm de part et d'autre du rachis (Kell et al. 2004). Si la lordose lombaire était trop prononcée, entraînant des difficultés pour positionner les optodes, celles-ci étaient positionnées au-dessus de la lordose, de manière à ce qu'elles restent parfaitement en contact avec la peau. Elle était maintenue avec des bandes de strapping, sur lesquelles nous avons superposé une bande élastique de manière à bien immobiliser les optodes contre la zone lombaire.

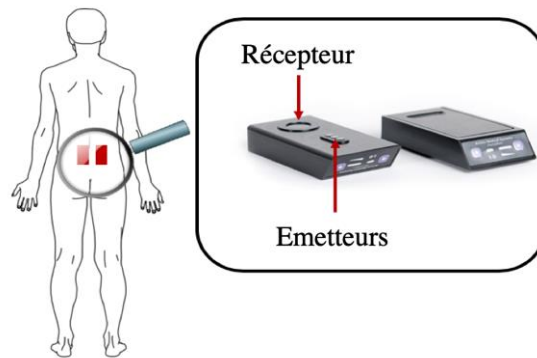


Figure 26 Optodes positionnées au niveau des muscles paravertébraux, composées d'un récepteur et de trois émetteurs de lumière proche infrarouge.

Variables mesurées

Dans le cadre de l'étude 1, les valeurs relatives aux deux optodes étaient utilisées pour l'analyse des données. Pour les autres études, les valeurs traitées étaient celles récoltées par l'optode positionnée sur le côté dominant de l'individu, ou sur le côté du dos le plus douloureux pour les patients lombalgiques.

L'évolution du taux de Hb-Mb désoxygénée (HHb) constitue un bon témoin pour estimer la désoxygénation par le muscle. Il va en effet augmenter en même temps que l'extraction par le muscle en O_2 augmentera. Au contraire, le taux d'Hb-Mb oxygénée (HbO_2) aura tendance à diminuer au fur et à mesure que l'extraction en O_2 augmentera. Cependant, l'évolution de HHb est privilégiée à celle de HbO_2 comme indicateur de l'extraction en O_2 , puisque le taux de HbO_2 va être non seulement dépendant de l'extraction en O_2 , mais également de la perfusion musculaire, puisque HbO_2 est très présent dans le sang artériel. Le taux d'hémoglobine total (THb) représente un bon reflet de l'apport en sang jusqu'au compartiment musculaire (Jones et al. 2009). Cet indice varie avec l'augmentation ou la diminution du volume

sanguin local. Il faut toutefois garder à l'esprit que la perfusion musculaire n'est pas uniquement dépendante du volume, mais également du débit sanguin, qui n'est pas mesurable par la technique NIRS (Ferrari et al. 2004 ; Ferrari et al. 2011).

Traitement et analyse des données

Les données de HbO₂, HHb et THb ont été récoltées à une fréquence de 10 Hz en continu (HbO_{2(t)}, HHb_(t) et THb_(t)). Elles étaient normalisées par la moyenne des valeurs obtenues sur une minutes de repos (HbO₂₍₀₎, HHb₍₀₎ et THb₍₀₎), de manière à obtenir ΔHbO₂, ΔHHb et ΔTHb. Les données étaient ensuite moyennées minute par minute et exprimées en unité arbitraire (UA).

$$\Delta\text{HbO}_{2(t)} = \text{HbO}_{2(t)} - \text{HbO}_{2(0)}$$

$$\Delta\text{HHb}_{(t)} = \text{HHb}_{(t)} - \text{HHb}_{(0)}$$

$$\Delta\text{THb}_{(t)} = \text{THb}_{(t)} - \text{THb}_{(0)}$$

3.2 L'analyse des échanges gazeux pulmonaires (Étude 2, 3, 4)

Un analyseur des échanges gazeux pulmonaires a été utilisé afin de mesurer cycle à cycle $\dot{V}\text{O}_2$ et $\dot{V}\text{CO}_2$ (Cortex Metamax 3B®, Leipzig, Allemagne) (Figure 27). Cet appareil est composé d'un masque facial, auquel est relié une turbine permettant de mesurer les volumes d'O₂ inspirés et les volumes de CO₂ expirés ainsi que la fréquence ventilatoire. L'appareil était associé à un cardiofréquence mètre (Polar Electro T31®, Finlande) de manière à obtenir en continu les valeurs de fréquence cardiaque.

Le logiciel Metasoft® était utilisé pour la mise en route de l'appareil et la récolte des données. Avant chaque utilisation, l'appareil était préchauffé pendant approximativement quarante-cinq minutes. Des calibrations étaient ensuite effectuées :

- Une calibration de la pression atmosphérique, mesurée par un baromètre.
- Une calibration de l'air, à partir de l'air ambiant et d'une bouteille de calibration de référence de 1,2L (15% d'O₂ et 5% de CO₂).
- Une calibration de la volumétrie, par l'intermédiaire d'une seringue manuelle d'une capacité de 3L (correspondant au volume respiratoire maximal pendant un test d'effort)

Le cardio fréquence mètre était positionné autour de la poitrine à l'aide d'une bande élastique.

Variables mesurées

La consommation en oxygène ($\dot{V}O_2$ en L.min⁻¹), le rejet de dioxyde de carbone ($\dot{V}CO_2$ en L.min⁻¹), le volume courant (V_t en L), la fréquence respiratoire (FR en cycle.min⁻¹) et la fréquence cardiaque (FC en battements.min⁻¹) ont été mesurés en continu. La consommation en oxygène rapportée à la masse de l'individu ($\dot{V}O_{2\text{relative}}$ en mL.min⁻¹.kg⁻¹) et le débit ventilatoire ($\dot{V}E$ en L.min⁻¹) étaient calculés directement par le logiciel.



Figure 27 Participant installé sur un dynamomètre isocinétique, équipé de l'analyseur d'échanges gazeux pulmonaires.

Traitement et analyse des données

Les valeurs de $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$ et FC ont été récoltées cycle à cycle. Les valeurs étaient ensuite moyennées sur la dernière minute de chaque exercice. À partir des valeurs de $\dot{V}O_2$ et de $\dot{V}CO_2$ enregistrés au cours de la dernière minute d'exercice, la dépense énergétique a pu être calculée (Équation 3). À partir de cette dernière et du travail total fourni au cours de chaque exercice, un indice d'efficacité mécanique a été calculé en utilisant une formule inspirée de Brouwer (Brouwer 1957), comme décrit dans l'étude de Moseley & Jeukendrup (2000) (Équation 4).

$$\text{Équation 3} \text{ Dépense énergétique (J.s}^{-1}\text{)} = [(3.869 \times \dot{V}O_2) + (1.195 \times \dot{V}CO_2)] \times (4.186/60) \times 1000$$

$$\text{Équation 4} \text{ Efficacité mécanique (\%)} = (W_{\text{tot}}/300) / DE_{\text{exercice}} * 100$$

Les données récoltées cycle à cycle ont aussi été interpolées seconde par seconde. À partir de ces valeurs, la cinétique de $\dot{V}O_2$ a été modélisée suivant un modèle mono-exponentiel.

$$\text{Équation 2 } \dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(0)} + A(1 - e^{-(t-TD)/\tau})$$

Où $\dot{V}O_{2(t)}$ représente la consommation en oxygène à un instant donné t , $\dot{V}O_{2(0)}$ représente la consommation en oxygène de repos, A correspond à l'amplitude entre $\dot{V}O_{2(0)}$, et la $\dot{V}O_2$ d'exercice à l'état stable, TD correspond au *time delay*, c'est-à-dire au délai nécessaire pour l'apparition des réponses cardiorespiratoires, et τ représente la constante de temps *tau*, c'est-à-dire le temps nécessaire pour atteindre 63% de la $\dot{V}O_2$ d'exercice à l'état stable. Le temps de réponse moyen ($TRM = TD + \tau$) a été calculé.

3.3 L'analyse de la lactatémie (Étude 4)

La mesure des concentrations en lactate (exprimées en mmol.L^{-1}) a été effectuée une minute avant et une minute après chaque exercice de 5 minutes à partir d'un échantillon de 0,2 μL de sang capillaire. Ainsi, l'augmentation de la concentration de lactate va traduire une augmentation de la contribution du métabolisme anaérobie en réponse à l'exercice, puisque le lactate est le produit final de la glycolyse en absence d' O_2 . La peau était préalablement nettoyée à l'aide d'une lingette imprégnée d'alcool isopropylique 70%, puis essuyée à l'aide d'une compresse stérile. Pour le prélèvement, des lancettes stériles étaient utilisées sur le bout d'un doigt permettant une profondeur de pénétration de 1,8 mm. Une goutte de sang était ensuite recueillie sur une bande réactive. La concentration de lactate dans l'échantillon sanguin récolté était ensuite analysée (Lactate Scout®, SensLab GmbH, Leipzig, Allemagne). L'augmentation de la lactatémie à l'exercice $\Delta[\text{La}]_{\text{exercice}}$ était calculée, comme la différence entre la lactatémie évaluée avant l'exercice $\Delta[\text{La}]_0$ et celle après exercice $\Delta[\text{La}]_1$

$$\Delta[\text{La}]_{\text{exercice}} = \Delta[\text{La}]_1 - \Delta[\text{La}]_0$$

3.4 L'électromyographie (Étude 1)

L'électromyographie de surface a été utilisée afin d'évaluer les recrutements musculaires mis en jeu au cours des exercices d'extension du tronc. La contraction musculaire va être permise par la création de potentiels d'actions au niveau de la jonction neuromusculaire, zone où communiquent le motoneurone et la fibre musculaire. Ainsi, ces potentiels d'action créent un signal myoélectrique. L'électromyographie permet l'enregistrement de la sommation

des potentiels d'actions d'un ensemble d'unités motrices activé, et renseigne ainsi sur le recrutement des unités motrices et sur la fatigabilité de ces dernières.

Huit paires d'électrodes de surface Delsys Trigno® (Delsys Inc., Boston, MA) étaient placées sur les sujets. Deux électrodes étaient placées de part et d'autre du rachis au-dessus des optodes NIRS, deux électrodes étaient positionnées au niveau des biceps fémoraux, à un-tiers de la ligne entre la tubérosité ischiatique et la tête de la fibula (McKeon et al. 2006), deux électrodes étaient placées sur les gastrocnémiens, à mi-distance entre le tendon d'Achille et la partie médiale de la cavité poplitée (Rainoldi et al. 2004), et deux électrodes étaient positionnées au niveau du muscle droit de l'abdomen, 3 cm de part et d'autre du point central de la ligne joignant l'apophyse xiphoïde au nombril (Ng et al. 1998) (*Figure 28*). L'électrode de référence était positionnée sur l'épine iliaque antéro-supérieure.

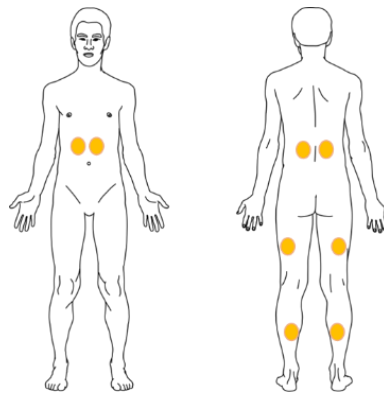


Figure 28 Placements des électrodes EMG sur les muscles abdominaux, paravertébraux, ischio-jambiers et gastrocnémiens.

Variables mesurées

L'activité neuromusculaire est associée au nombre de pointes et à l'amplitude du signal électromyographique. Ainsi nous nous sommes intéressés à deux variables pour l'évaluation de l'implication et de la fatigue musculaire :

- Le « *root mean square* » (RMS) consiste à calculer la racine du carré de l'amplitude moyennée et filtrée. Ainsi, le RMS augmente en même temps que le nombre d'unités motrices sollicitées (Merletti et al. 2001).
- Le « *mean power frequency* » (MPF) ; est la moyenne de la fréquence des puissances, qui renseigne sur la vitesse de conduction des influx nerveux, et qui diminue avec l'apparition de la fatigue neuromusculaire (Merletti et al. 2001).

Traitement et analyse des données

Les signaux électromyographiques enregistrés étaient amplifiés, filtrés (gamme de fréquence de 10 Hz à 1 kHz) avec un système d'acquisition spécifique (Power Lab 16/30-ML880 / P®; ADInstruments, Bella Vista, NSW, Australie) et le logiciel LabChart 7®.

Pour chaque extension du tronc et pour chaque électrode, le RMS a été calculé. Il était exprimé en pourcentage de la valeur maximale de RMS mesurée au cours des extensions du tronc maximales, au début de la visite (cf. 2.1. Exercice isocinétique maximal (mode arthromoteur)). Le MPF a été déterminé à partir d'une analyse du spectre du signal. Les valeurs de RMS et de MPF ont ensuite été moyennées minute par minute.

4. Évaluations spécifiques aux patients lombalgiques chroniques*4.1 Évaluation physique*

Le niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux a été évalué par le test de Sorensen (Biering-Sørensen 1984). Ce test consiste à maintenir une position sollicitant les muscles extenseurs du tronc le plus longtemps possible. Dans nos études, le test était arrêté si le participant atteignait 150 secondes, ce qui correspond au temps de maintien moyen des sujets sains dans l'étude de Hultman et al. 1993.

Le niveau de pratique d'activités physiques a été évalué avec le questionnaire de Baecke, à travers 3 catégories : les activités physiques dans le cadre de l'activité professionnelle, dans le cadre des activités sportives, et dans le cadre des activités de loisirs (Baecke et al. 1982; version française: Bigard et al. 1992). Ce questionnaire a été rempli uniquement à P1 et P3, puisque l'objectif était de connaître le niveau d'activité dans la vie quotidienne et habituelle, et non pendant le séjour à l'hôpital. Les réponses données par les patients aux questions relatives à l'activité professionnelle, concernaient la dernière activité en date.

4.2 Évaluation psychosociale

Les patients ont rempli un ensemble de questionnaire pour l'évaluation des facteurs psychosociaux (*Tableau 8*) :

La perception des participants sur leurs capacités fonctionnelles a été évaluée à partir de l'Échelle d'Incapacité Fonctionnelle pour l'Évaluation de la Lombalgie (EIFEL) : Ce questionnaire est la version française (Coste et al. 1993) du questionnaire de Roland-Morris

(Roland & Morris 1983). Il est composé de 24 items qui correspondent à des situations de limitation fonctionnelle susceptibles de correspondre à des situations auxquelles pourraient être confrontés les lombalgiques. Plus le score final est élevé, plus les répercussions fonctionnelles de la lombalgie sont importantes.

L'incidence de la lombalgie chronique dans la vie quotidienne des patients, c'est-à-dire dans quelle mesure la pathologie va perturber la qualité de vie des sujets, a été évaluée avec l'auto-questionnaire de Dallas (Lawlis et al. 1989 ; version française: Marty et al. 1998). À travers 16 questions, ce questionnaire permet d'estimer en pourcentage la répercussion de la lombalgie sur les activités quotidiennes, les activités professionnelles et de loisirs, l'anxiété/dépression et la sociabilité.

Les peurs et les croyances des sujets souffrant de lombalgie qui peuvent mener à des comportements d'évitement du mouvement ont été évaluées avec le *Fear-Avoidance Beliefs Questionnaire* (Waddell et al. 1993 ; version française : Chaory et al. 2004). Il est composé de deux catégories : l'activité professionnelle et l'activité physique. Plus le score est haut, plus les croyances sont élevées.

Pendant l'hospitalisation, l'état d'anxiété et de dépression des patients était évalué par le questionnaire *Hospital Anxiety Depression* (Zigmond & Snaith 1983 ; version française : Lépine et al. 1985). Un score total <7 correspond à une absence de symptomatologie, tandis qu'un score >14 correspond à une symptomatologie certaine. Ce questionnaire a été rempli par les patients à P1 et P2 uniquement, puisqu'il évalue l'état psychologique dans le cadre d'une hospitalisation.

L'état de santé général a été évalué avec le *Medical Outcome Study Short Form – 36* (SF-36). Il est composé de 36 items et inspiré du *Medical Outcome Study* (Ware & Sherbourne 1992 ; version française : Perneger et al. 1995). Il permet d'évaluer l'état de santé des individus, à travers huit sous-catégories : l'activité physique, les limitations physiques, les douleurs physiques, la perception de la santé globale, la vitalité, le fonctionnement social, les limitations émotionnelles et la santé mentale. Un pourcentage est associé à chaque réponse. Plus la moyenne des pourcentages est élevée, meilleure est l'état de santé de l'individu. Ce questionnaire a été rempli uniquement à P1 et P3, puisque l'objectif était d'évaluer l'état de santé des participants dans le cadre d'un mode de vie habituel.

Tableau 8 Ensemble des questionnaires distribués aux lombalgiques à P1, P2 et/ou P3.

	P1	P2	P3
Questionnaire de Dallas			
- Activités quotidiennes			
- Activités professionnelles et de loisirs	√	√	√
- Anxiété/Dépression			
- Sociabilité			
Échelle d'Incapacité Fonctionnelle pour l'Évaluation de la Lombalgie (EIFEL)	√	√	√
Questionnaire <i>Fear Avoidance Beliefs</i> (FABQ)			
- Activités professionnelles	√	√	√
- Activités physiques			
Questionnaire <i>Hospital Anxiety Depression</i> (HAD)			
- Anxiété	√	√	
- Dépression			
Questionnaire de Baecke			
- Activités professionnelles			
- Activités sportives	√		√
- Activités de loisirs			
Questionnaire <i>Short Form-36</i> (SF-36)			
- Santé physique	√		√
- Santé mentale			

(P1/P2/P3 : Période d'évaluation 1, 2, 3).

III) Analyses statistiques

Les tests (*Figure 29*) ont été effectués avec le logiciel Sigmasat 3.5 Les différences et les corrélations étaient considérées comme significatives lorsque $P < 0,05$. Toutes les données sont présentées en moyenne \pm erreur standard (ES). Pour chaque variable, la normalité de la distribution était vérifiée avec un test de Shapiro-Wilk.

1. Comparaison de variables dépendantes

Les variables analysées à l'exercice et les résultats aux tests musculaires et aux questionnaires, ont été comparés, entre deux groupes ou entre deux périodes, par des tests t de Student (pour échantillons appariés pour la comparaison des groupes de l'étude 3 et pour la comparaison des périodes dans l'étude 4) lorsque la distribution était normale, ou par des tests de Wilcoxon si la distribution était non normale. Pour l'étude 2 (3 groupes), des analyses de variance étaient effectuées si la distribution était normale, et des tests de Friedman si la

distribution était non normale. Si des différences étaient détectées un test post-hoc de Bonferroni a été utilisé pour isoler les différences.

2. Analyse des évolutions des variables pendant l'exercice

Pour suivre les évolutions des réponses pendant l'exercice, des analyses de variances à mesures répétées ont été effectuées ; à une voie dans l'étude 1 (facteur temps), et à deux voies dans les autres études (Étude 2 et 3 : temps x groupe; Étude 4 : temps x période). Si des différences étaient détectées, un test post-hoc de Bonferroni a été utilisé pour isoler ces différences.

3. Corrélations entre l'évolution de deux variables

Dans le cadre de l'étude 1, des tests de corrélations de Spearman ont été effectués pour déterminer la relation entre la désoxygénation des muscles paravertébraux à l'exercice et le niveau d'activation neuromusculaire : pour chaque muscles, les valeurs du RMS de chaque participant, à chaque minute, ont été analysées en fonction des valeurs de ΔHHb .

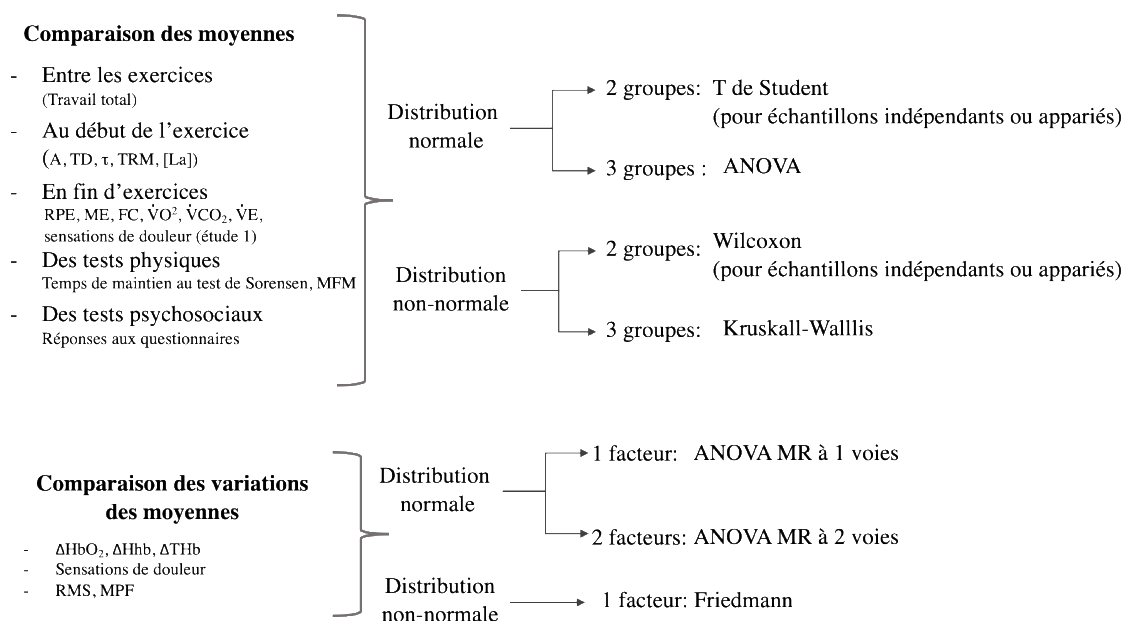


Figure 29 Méthode d'analyse statistique (A : Amplitude ; TD : temps de délai ; τ : constante de temps ; TRM : temps de réponse moyen ; [La] : lactatémie ; RPE : perception de l'effort ; ME : efficacité mécanique ; FC : fréquence cardiaque ; $\dot{V}\text{O}_2$: consommation en oxygène ; $\dot{V}\text{CO}_2$: rejet en dioxyde de carbone ; $\dot{V}\text{E}$: débit ventilatoire ; MFM : moment de force maximal ; HbO_2 : oxyhémoglobine ; HHb : désoxyhémoglobine ; THb : volume sanguin musculaire ; RMS : root mean square ; MPF : mean power frequency ; ANOVA : analyse de variance ; MR : mesures répétées.)

PARTIE 4

LISTE DES COMMUNICATIONS ET

DES PUBLICATIONS

Ces travaux de thèse ont fait l'objet de six communications en congrès:

- Juin 2018
Lille (59) 2^{ème} congrès de la *Société de Physiologie et de Biologie Intégrative*
Présentation poster « **Effects of 4-week exercise therapy program in chronic low back pain patients on aerobic muscle metabolism** »
Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci.
- Novembre 2017
Paris (75) XIX^{èmes} *Rencontres nationales isocinétiques*
Communication orale- « **Mise en place d'un exercice sous-maximal d'extension du tronc en mode arthromoteur pour l'analyse du métabolisme aérobie musculaire** »
Agathe Anthierens, Patrick Mucci, André Thevenon, Nicolas Olivier.
- Octobre 2017
Dijon (21) 17^{ème} *Congrès de l'Association des Chercheurs en Activité Physique et Sportive*
Communication orale « **Influence de la spécialisation sportive sur les réponses du métabolisme aérobie des muscles du tronc** »
Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci.
- Septembre 2017
Lille (59) Colloque des doctorants : *Journée André Verbert*
Présentation poster « **Influence of sport specialization on aerobic metabolism responses in trunk muscles** »
Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci
- Octobre 2016
Saint-Etienne (42) 31^{ème} *Congrès de la Société Française de Médecine physique et de Réadaptation*
Communication orale « **Aerobic metabolism response in paraspinal muscles of chronic low back pain patients and judo athletes during an isokinetic trunk extension exercise** »
Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, Patrick Mucci, André Thevenon
doi : 10.1016/j.rehab.2016.07.049
- Mai 2016
Amiens (80) 9^{ème} *Congrès de l'Association Francophone en Activité Physique Adaptée*
Communication orale « **Étude comparative du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux chez des patients lombalgiques et des judokas : résultats préliminaires** »
Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci

À ce jour, ces travaux de thèse ont permis la publication d'un article (étude 2), et la soumission de deux autres articles (étude 1 et étude 4) (cf. *annexes*). Pour la troisième étude, une analyse préliminaire des résultats sera présentée car l'inclusion des volontaires sains n'est pas encore achevée.

Étude 1: Paraspinal muscles deoxygenation and neuromuscular involvement of agonist and antagonist muscles during isokinetic trunk extension exercise.

Agathe Anthierens, Frédéric Daussin, Khaoula El Ghali, André Thevenon, Patrick Mucci, Nicolas Olivier. *Article en cours de soumission.*

Étude 2: Trunk muscles aerobic metabolism responses in endurance athletes, combat athletes, and untrained men.

Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. Accepté pour publication dans *Int J Sports Med.* 2019; 40: 1–6. doi : 10.1055/a-0856-7207

Étude 3: Aerobic metabolism responses to isokinetic trunk extension exercise in chronic low back pain patients.

Agathe Anthierens, Patrick Mucci, Nicolas Olivier, André Thevenon. *Expérimentations en cours*

Étude 4: Benefits of a four-week functional restoration program in chronic low back pain patients and three-month follow-up: focus on paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercise.

Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. *Article en cours de soumission.*

Une collaboration professionnelle a également fait l'objet d'une publication, en dehors du travail de thèse.

Acute effects of repeated cycling sprints in hypoxia induced by voluntary hypoventilation.

Woorons X, Mucci P, Aucouturier J, Anthierens A, Millet GP.

Publié dans Eur J Appl Physiol. 2017;117(12):2433-2443.

doi: 10.1007/s00421-017-3729-3.

PARTIE 5

PRESENTATION DES ETUDES

ÉTUDE 1

Désoxygénation des muscles paravertébraux et implication neuromusculaire des muscles agonistes et antagonistes au cours d'un exercice isocinétique d'extension du tronc

Paraspinal muscles deoxygenation and neuromuscular involvement of agonist and antagonist muscles during isokinetic trunk extension exercise.

Agathe Anthierens, Frédéric Daussin, Khaoula El Ghali, André Thevenon, Patrick Mucci, Nicolas Olivier. *Article en cours de soumission.*

CONTEXTUALISATION

Dans le cadre des travaux de cette thèse, notre volonté était de mettre en place des exercices standardisés d'extension du tronc pour limiter les libertés de mouvement et focaliser le travail sur les muscles paravertébraux, en maîtrisant les intensités, les durées, et les vitesses d'exercice. Ces exercices devaient être suffisamment longs pour solliciter de manière prépondérante la filière aérobie. Nous avons alors choisi d'utiliser un dynamomètre isocinétique qui permet une grande standardisation du mouvement.

Le mouvement d'extension du tronc est caractérisé par une action synergique des muscles du tronc et des muscles de la face postérieure des membres inférieurs. Ainsi, lors d'exercices prolongés d'extension du tronc, l'implication des muscles co-agonistes aux *erector spinae* (les muscles biceps fémoraux et gastrocnémiens) (Leinonen et al. 2000 ; Clark et al. 2002) et celle des muscles abdominaux (le muscle grand droit) (Cholewicki et al. 1997) ne sont pas à négliger. Cela est d'autant plus vrai lors de l'apparition des premiers signes de fatigue neuromusculaire des muscles paravertébraux qui peut être associée à une modification du pattern de contraction musculaire (Clark et al. 2003).

Puisqu'un déterminant de la fatigue musculaire au cours d'un exercice prolongé est l'adéquation des réponses métaboliques et hémodynamiques pour répondre aux besoins en O₂, la mesure concomitante de l'activité neuromusculaire et de l'oxygénation des muscles paravertébraux est un moyen pertinent pour déterminer si les réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice peuvent être liées à l'apparition d'une potentielle fatigue neuromusculaire au regard des muscles paravertébraux.

L'objectif de cette étude était d'évaluer les réponses neuromusculaires des différents muscles et de déterminer les potentiels liens entre l'augmentation de la désoxygénation musculaire engendrée par l'exercice, et la fatigabilité neuromusculaire, lors de notre protocole d'exercices isocinétiques sous-maximaux. L'hypothèse était que l'augmentation de la désoxygénation des muscles paravertébraux serait associée à la fatigue neuromusculaire au regard des muscles paravertébraux, et en parallèle à l'augmentation de l'activation des muscles co-agonistes (biceps fémoraux et gastrocnémiens).

METHODES

Participants

Seize sujets ont participé à cette étude (*Tableau 9*). Ils étaient tous âgés entre 18 et 25 ans et pratiquaient tous une activité sportive régulière.

Tableau 9 Caractéristiques des participants de l'étude 1.

Sexe (H/F)	Age (années)	Taille (m)	Masse corporelle (kg)	Moment de force maximal (N·m)
13/3	19,8 ± 0,2	1,77 ± 0,01	68,0 ± 1,7	280,8 ± 25,0

Moyenne ± ES (H : homme ; F : femme).

Plan de l'étude

Après la visite d'inclusion, les participants ont effectué une autre visite lors de laquelle ils ont réalisé les exercices isocinétiques en mode arthromoteur (un exercice maximal et deux exercices sous-maximaux d'extension du tronc).

Pendant les exercices, l'oxygénation des muscles paravertébraux, l'activité neuromusculaire des muscles paravertébraux, biceps fémoraux, gastrocnémiens et du grand droit, la perception de l'effort, et les sensations de douleur dans le bas du dos et à l'arrière des cuisses étaient mesurées, par l'utilisation de la spectroscopie proche infrarouge, de l'électromyographie, de l'échelle de Borg et d'une échelle visuelle analogique (*Figure 30*).

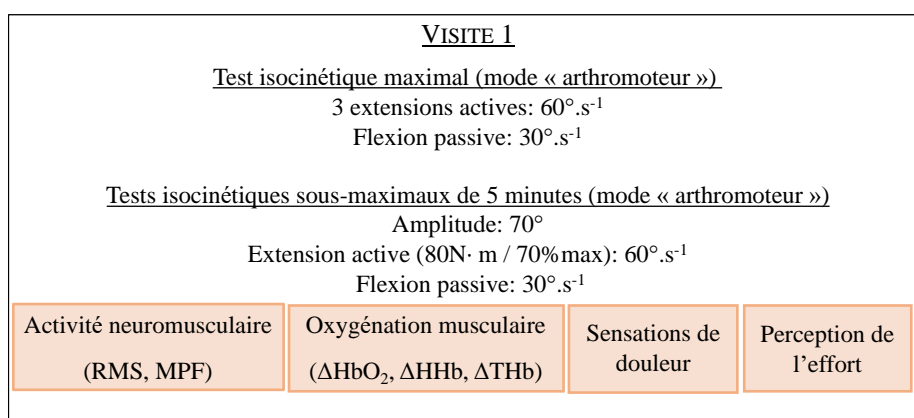


Figure 30 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 1 (RMS : root mean square ; MPF : mean power frequency).

RESULTATS PRINCIPAUX

Le travail total développé au cours de l'exercice à 70%max était supérieur à celui développé au cours à 80 N·m ($P<0,001$) (Figure 31). Les sensations de douleur dans le bas du dos étaient supérieures à celles dans les cuisses à la fin de l'exercice à 80 N·m ($P=0,029$) (Figure 32). À la fin de l'exercice à 80 N·m, la perception de l'effort était de $10,0 \pm 0,7$ (correspondant à un effort « très léger » à « léger »). À la fin de l'exercice à 70%max, elle était de $15,1 \pm 0,9$ UA (correspondant à un effort « dur »).

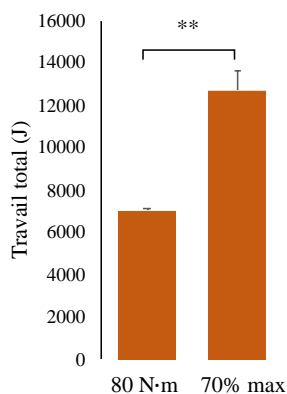


Figure 31 Travail total développé au cours de chaque exercice de 5 minutes. Moyenne \pm ES. Différence significative : ** $P<0,001$.

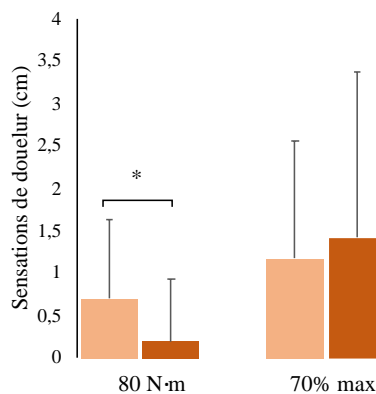


Figure 32 Sensations de douleur dans le bas du dos et à l'arrière des cuisses à la fin des exercices. Moyenne \pm ES. Différence significative : * $P<0,05$.

Réponses hémodynamiques et métaboliques au cours de l'exercice à 80 N·m

Δ HbO₂ diminuait de manière transitoire au regard des muscles paravertébraux (À gauche $P<0,001$; à droite $P=0,009$), ainsi que Δ THb du côté gauche ($P<0,001$) tandis que Δ Hhb augmentait de part et d'autre du rachis ($P<0,001$) (Figure 33).

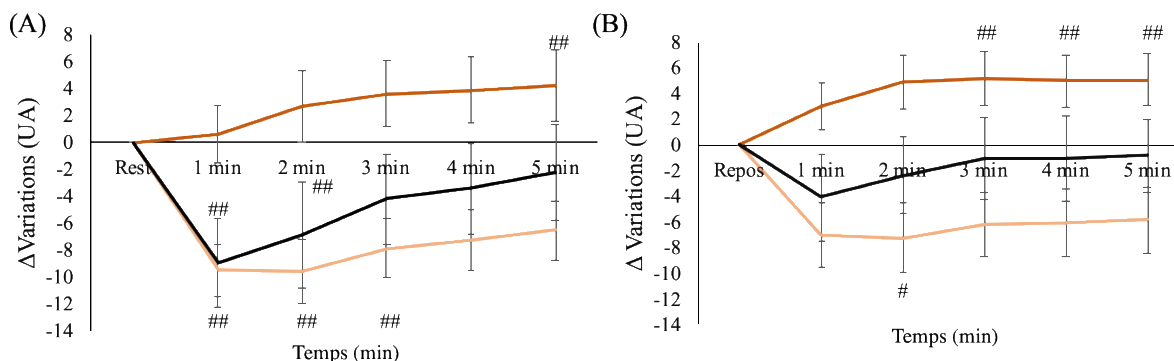


Figure 33 Évolution de Δ HbO₂, Δ Hhb et Δ THb évalués au regard des muscles paravertébraux (A) du côté gauche et (B) du côté droit, au cours de l'exercice à 80 N·m. Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport au repos # $P<0,05$ ## $P<0,001$.

Réponses neuromusculaires au cours de l'exercice à 80 N·m

Au cours de l'exercice à 80 N·m, les signaux électromyographiques témoignaient d'une modification du MPF au regard du muscle gastrocnémien droit (P=0,026) et du grand droit de l'abdomen gauche (P=0,047), d'une diminution du RMS au regard des muscles biceps fémoraux (À droite : P=0,001; à gauche : P=0,032) et gastrocnémiens (À gauche : P=0,002), tandis que le RMS au regard du muscle grand droit augmentait (À droite : P=0,023) (Figure 34).

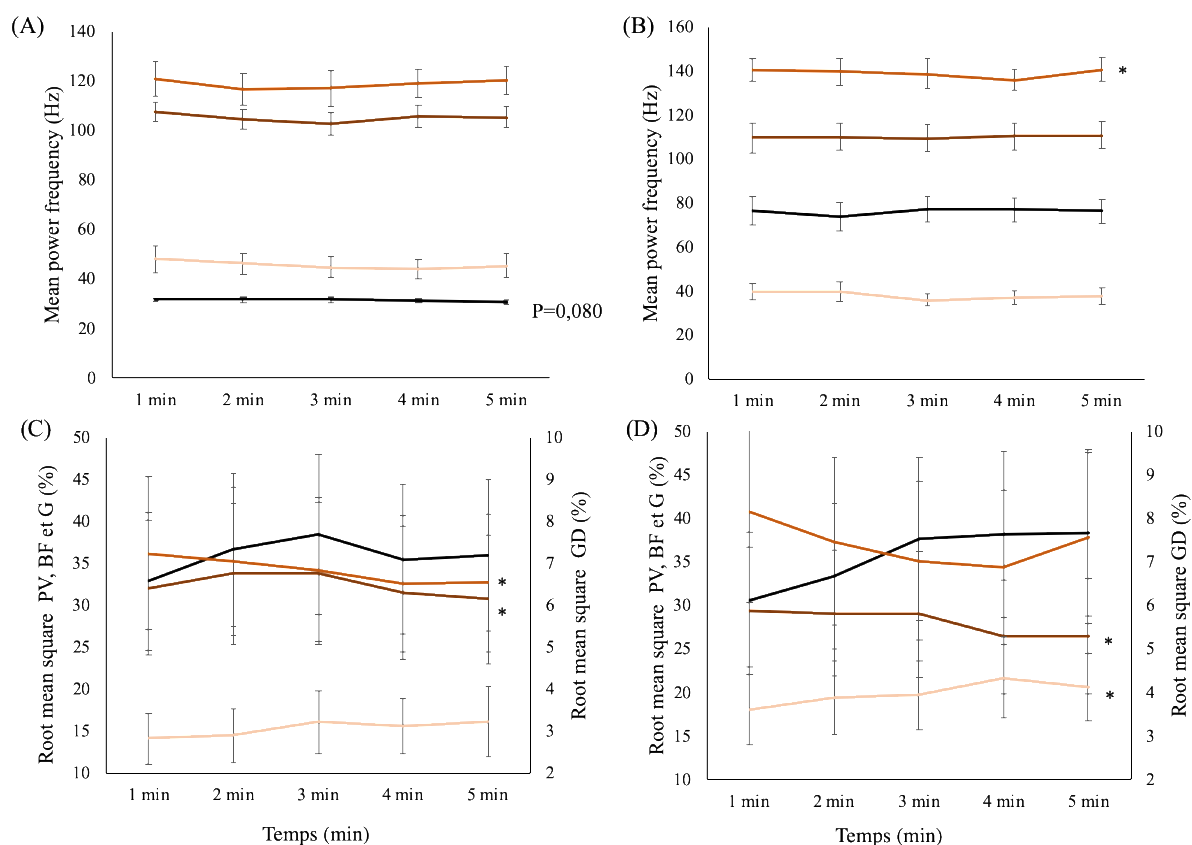


Figure 34 Évolution du *mean power frequency* et du *root mean square*, mesurés au niveau des muscles paravertébraux (PV) ■, biceps fémoraux (BF) ■, gastrocnémiens (G) ■ et du grand droit (GD) ■ ((A) et (C) côté gauche, (B) et (D) côté droit) au cours de l'exercice à 80 N·m. Moyenne ± ES. Différence significative au cours du temps : * P<0,05.

Il y avait une corrélation positive entre les valeurs de RMS de chaque muscle agoniste à l'extension du tronc (muscles paravertébraux, biceps fémoraux et gastrocnémiens) et le niveau de désoxygénation au regard des muscles paravertébraux (*Figure 35*).

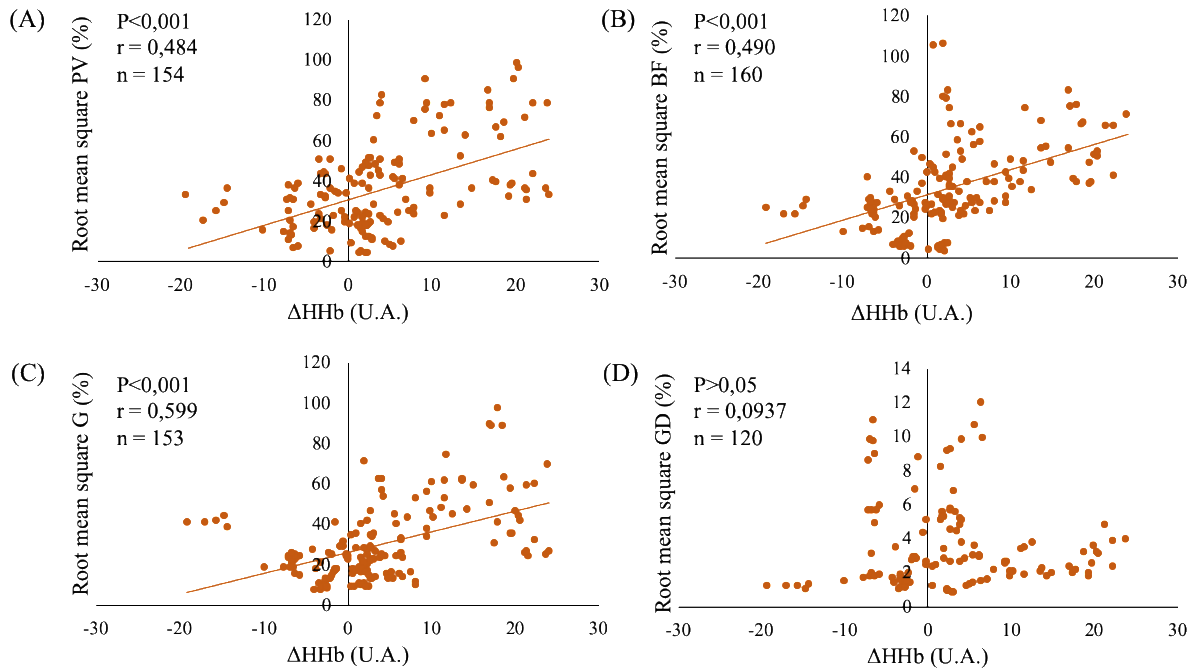


Figure 35 Corrélations entre ΔHHb et RMS mesurés au regard (A) des muscles paravertébraux (PV), (B) biceps fémoraux (BF), (C) gastrocnémiens (G), (D) et du muscle grand droit (GD), au cours de l'exercice à 80 N·m.

Réponses neuromusculaires au cours de l'exercice à 70% max (Données non soumises pour publication)

Au cours de l'exercice à 70%max, l'analyse des signaux électromyographiques témoignait d'une modification du MPF enregistré au regard des muscles biceps fémoraux (À gauche : $P=0,003$) et d'une augmentation du RMS au regard du muscle grand droit (À droite : $P<0,001$; à gauche : $P<0,001$) (Figure 36).

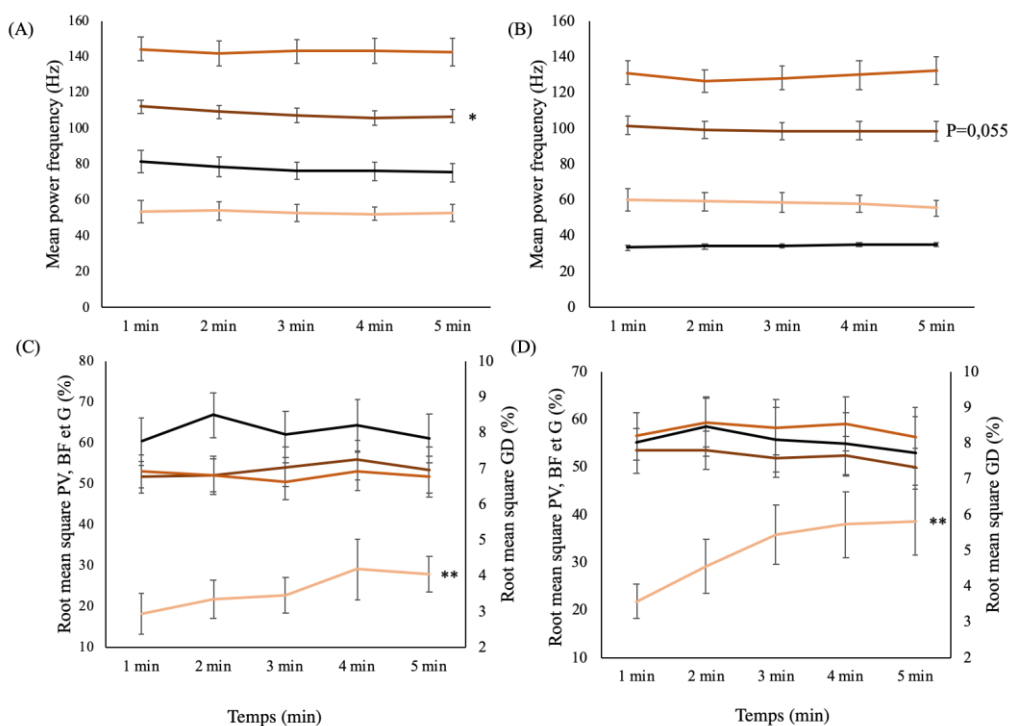


Figure 36 Évolution du mean power frequency et du root mean square, mesurés au niveau des muscles paravertébraux (PV) ■, des biceps fémoraux (BF) ■, des gastrocnémiens (G) ■ et du grand droit (GD), ((A) et (C) côté gauche, (B) et (D) côté droit) au cours de l'exercice à 70% max. Moyenne ± ES. Différence significative au cours du temps : * $P<0,05$; ** $P<0,001$.

DISCUSSION

À l'exercice, le niveau de désoxygénation au regard des muscles paravertébraux augmentait. Toutefois, leur activité neuromusculaire restait inchangée. Celle des muscles biceps fémoraux et gastrocnémiens témoignait d'une diminution de leur activation au fur et à mesure de l'exercice (diminution du RMS) et/ou d'une manifestation de fatigue (diminution du MPF), tandis que le niveau d'activation des muscles abdominaux augmentait.

Implication des muscles du tronc

Au cours des exercices de 5 minutes, l'activité neuromusculaire des muscles paravertébraux restait inchangée. L'absence de fatigue neuromusculaire au cours de l'exercice à 80 N·m pourrait s'expliquer par le fait que l'intensité d'exercice était faible par rapport à la force maximale des participants. Toutefois, des résultats similaires ont été retrouvés au cours de l'exercice à 70%max qui correspondait pourtant à un effort « dur », d'après l'échelle de Borg (Borg, 1982).

La modification des signaux électromyographiques au regard du muscle grand droit montre une augmentation du niveau d'activation de ces muscles (augmentation du RMS). L'augmentation de l'activation du muscle grand droit lors d'un exercice sollicitant pourtant spécifiquement les muscles extenseurs du tronc, serait associée à une augmentation de la pression intramusculaire au regard des abdominaux qui permettrait de réduire celle exercée dans les muscles paravertébraux (Cresswell et al. 1994; Lee et al. 2006). L'augmentation de la sollicitation abdominale pourrait ainsi être un moyen de préserver le rachis.

Implication des muscles co-agonistes

Les données mettent en évidence une diminution du niveau d'activation des muscles biceps fémoraux et gastrocnémiens à l'exercice, au contraire de celle des muscles paravertébraux, et même une diminution du MPF au regard des muscles gastrocnémiens qui suggère l'apparition d'une fatigue neuromusculaire. Ces résultats mettent en évidence le recrutement conséquent des membres inférieurs lors des exercices et l'apparition d'une fatigue neuromusculaire (Merletti et al. 2001; Girard et al. 2017). L'implication de ces muscles à l'exercice pourrait être un moyen de préserver le rachis, en limitant celle des muscles paravertébraux.

Sensations de douleur à l'exercice

Malgré ces comportements neuromusculaires (recrutement des muscles des membres inférieurs), les sensations de douleur au cours du premier exercice étaient supérieures au niveau du bas du dos par rapport aux cuisses. Puisque les signaux électromyographiques n'ont mis en évidence aucune fatigue neuromusculaire au regard des muscles paravertébraux, cela suggère que ces sensations de douleur ne sont pas liées à une fatigue neuromusculaire chez des sujets jeunes, sportifs et en bonne santé. Or, elles pourraient être en lien avec les réponses métaboliques et/ou hémodynamiques, qui variaient à l'exercice.

Conclusion

- ◆ Les exercices entraînent une augmentation de la désoxygénation et une diminution transitoire du volume sanguin au niveau des muscles paravertébraux qui n'est pas associée à une modification de l'implication de ces muscles.
- ◆ Au fur et à mesure de l'exercice, on observe une diminution de l'activation des muscles biceps fémoraux, gastrocnémiens et du grand droit et une augmentation de l'activation du muscle grand droit.
- ◆ Les muscles paravertébraux semblent être préservés d'une apparition de fatigue neuromusculaire pendant les exercices de 5 minutes, au contraire des muscles biceps fémoraux et gastrocnémiens.

ÉTUDE 2

Réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux :
influence de l'entraînement et de la spécialité sportive

**Trunk Muscle Aerobic Metabolism Responses in Endurance Athletes,
Combat Athletes and Untrained Men.**

Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. Int J
Sports Med 2019; 40: 1–6. DOI : <http://doi.org/10.1055/a-0856-7202>

CONTEXTUALISATION

La pratique d'activités sportives est associée à la modification des réponses aérobies lors d'exercices sollicitant le corps dans sa globalité. Cependant, il n'existe aujourd'hui aucune donnée rapportant les effets spécifiques de la pratique d'activités sportives au regard du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux. La pratique d'activités pourrait être associée à une modification des réponses et augmenter la contribution aérobie à l'exercice. De telles modifications des réponses pourrait repousser la fatigabilité des muscles paravertébraux à l'exercice et ainsi limiter les risques de blessures et de contre-performances (Hibbs et al. 2008 ; Chaudhari et al. 2014). On ignore aujourd'hui si une forte sollicitation aérobie est suffisante pour modifier les réponses métaboliques des muscles du tronc ou si un haut niveau de sollicitation de ces muscles est nécessaire pour permettre ce type de modification.

Le cyclisme est une pratique sportive associée à une forte sollicitation aérobie, sans sollicitation spécifique des muscles du tronc (Mujika & Padilla 2001). Au contraire, le judo est une pratique associée à une forte sollicitation des muscles du tronc, de telle manière qu'un haut niveau de force des muscles extenseurs du tronc et qu'un meilleur ajustement postural ont déjà été associés aux judokas pratiquants à un niveau international (Kort & Hendriks 1992; Barbado et al. 2016). Chacune de ces pratiques pourrait être associée à une modification des réponses hémodynamiques et/ou métaboliques à l'exercice, au regard des muscles paravertébraux.

L'objectif de cette étude était de déterminer quelles adaptations métaboliques et hémodynamiques caractérisent les sportifs entraînés en endurance (les cyclistes), et ceux dont la pratique est associée à une sollicitation intensive les muscles du tronc (les judokas). L'hypothèse était que la pratique du cyclisme serait associée à une accélération de la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ et à un plus haut volume sanguin musculaire, résultant d'adaptations cardiaques et hémodynamiques chez les athlètes permises par la pratique. Les judokas seraient quant à eux caractérisés par un haut niveau d'efficacité mécanique, résultant de la sollicitation intensive et du renforcement spécifique des muscles du tronc dans le cadre des entraînements et des combats.

METHODES

Participants

Trois groupes ont été composés (*Tableau 10*) :

Le premier groupe était composé de dix cyclistes (CY). Ils prenaient part à des compétitions de niveau régional, national ou international et pratiquaient de 10 à 25 heures par semaines.

Le second groupe était composé de onze judokas (JU), qui devaient pratiquer au moins 2 heures de judo par semaine, et en complément effectuer des séances hebdomadaires de renforcement musculaire. Ils prenaient part à des compétitions à un niveau régional, national ou international. Tous les sujets inclus dans ce groupe étaient ceinture noire, exceptés trois d'entre eux (une ceinture marron, une bleue et une orange). Ces trois derniers étaient moins expérimentés dans le judo, mais pratiquaient d'autres sports de combat auparavant, et/ou étaient habitués aux exercices spécifiques et réguliers de renforcement des muscles du tronc, en association au judo, depuis au moins 3 ans.

Le troisième groupe était composé de sujets non sportifs (NS), dont le niveau d'activité physique quotidienne respectait les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (2010) à travers leurs activités de loisirs et/ou de leur activité professionnelle (Vuillemin 2011). Toutefois, ils ne pratiquaient pas d'activité sportive de manière régulière et structurée.

Tableau 10 Caractéristiques des participants de l'étude 2.

	Judokas	Cyclistes	Non-sportifs
Sexe (H/F)	11/0	10/0	9/0
Âge (années)	19,7 ± 0,4	20,3 ± 0,7	23,3 ± 0,4
Taille (m)	1,80 ± 0,08	1,76 ± 0,02	1,81 ± 0,02
Masse (kg)	78,1 ± 3,5	64,2 ± 1,9	68,8 ± 2,9
Durée de pratique (années)	11,9 ± 1,4	9,4 ± 1,8	NC

Moyenne ± ES. (H : homme ; F : femme ; NC : non concernés).

Plan de l'étude

Après la visite d'inclusion, les participants ont effectué une visite pour réaliser les exercices isocinétiques en mode arthromoteur (un exercice maximal et deux exercices sous-maximaux d'extension du tronc). Pendant les exercices sous-maximaux, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}E$, l'oxygénation des muscles paravertébraux et la perception de l'effort étaient évalués, par l'utilisation d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires, de la spectroscopie proche infrarouge et de l'échelle de Borg

Lors de la seconde visite ils ont réalisé un exercice maximal en mode « isocinétisme classique » (Figure 37).

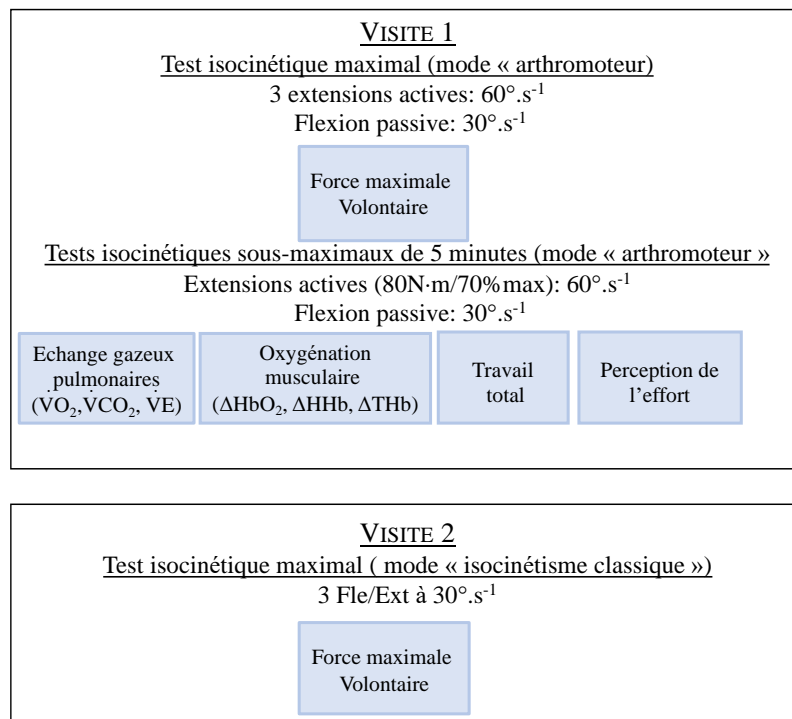


Figure 37 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 2.

RESULTATS PRINCIPAUX

Comparaison de la force maximale des muscles extenseurs du tronc et du travail total

Au cours des deux tests maximaux, le moment de force maximal développé lors d'une extension du tronc était supérieur chez les judokas par rapport aux cyclistes ($P=0,047$ et $P=0,011$) et aux non-sportifs ($P=0,024$ et $P=0,033$) (Figure 38). Ainsi, le travail total développé au cours de l'exercice à 70% max était supérieur chez les judokas par rapport aux deux autres groupes ($P<0,001$), tandis que celui développé au cours de l'exercice à 80 N·m n'était pas différent entre les groupes (Figure 39).

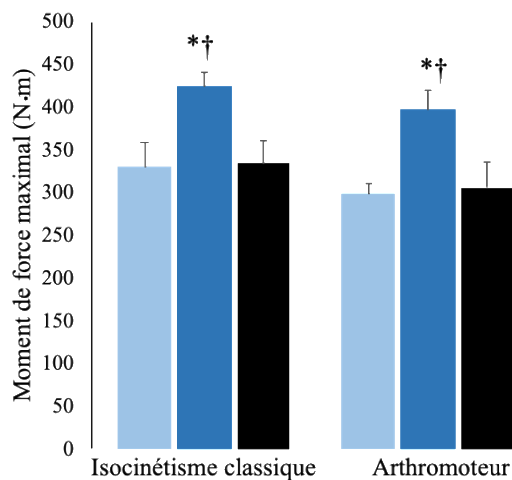


Figure 38 Moment de force maximal développé au cours d'une extension du tronc en mode isocinétique classique et en mode arthromoteur chez les cyclistes \square , les judokas \blacksquare et les non-sportifs \blacksquare . Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport à NS : * $P<0,05$. Différence significative par rapport à CY : † $P<0,05$.

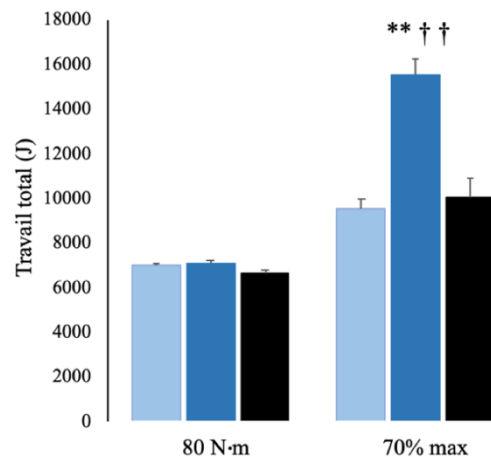


Figure 39 Travail total développé au cours de chaque exercice chez les cyclistes \square , les judokas \blacksquare et les non-sportifs \blacksquare . Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport à NS : ** $P<0,001$. Différence significative par rapport à CY : †† $P<0,001$.

**Réponses métaboliques et hémodynamiques aux cours des exercices sous-maximaux
(Données de l'exercice à 80 N·m non publiées)**

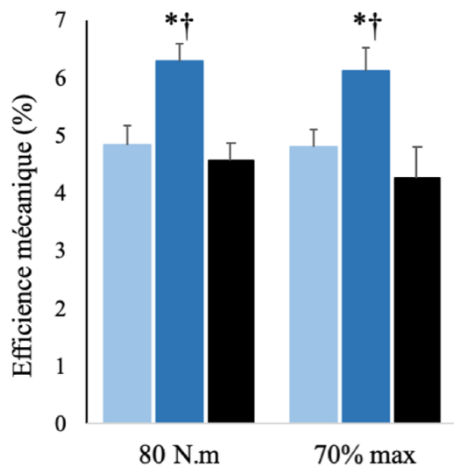
Au cours de l'exercice à 80 N·m, chez les judokas, $\dot{V}O_2$ était inférieur par rapport aux non-sportifs ($P=0,018$), tandis que $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}E$ étaient inférieurs par rapport aux deux autres groupes (CY : $P=0,012$ et NS : $0,004$) (CY : $P=0,008$ et NS : $P=0,001$). La fréquence cardiaque était supérieure chez les non-sportifs (CY : $P=0,001$ et JU : $P=0,001$). La perception de l'effort n'était pas différente entre les groupes (Tableau 11).

Au cours de l'exercice à 70% max, $\dot{V}O_2$ était supérieur chez les judokas par rapports aux non-sportifs ($P=0,010$), tandis que $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}E$ étaient supérieurs chez les judokas par rapport aux cyclistes ($P=0,027$ et $P=0,007$). La fréquence cardiaque était quant à elle inférieure chez les cyclistes (JU : $P=0,001$ et NS : $P=0,007$). La perception de l'effort n'était pas différente entre les groupes (Tableau 11).

Tableau 11 Réponses cardiorespiratoires et perception de l'effort mesurées à la fin de chaque exercice chez les cyclistes, les judokas et les non-sportifs.

	Variables	Cyclistes	Judokas	Non-sportifs
80 N·m	$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)	1,45 ± 0,12	1,12 ± 0,05 *	1,38 ± 0,06
	$\dot{V}CO_2$ (L.min ⁻¹)	1,33 ± 0,12	0,96 ± 0,05 *†	1,40 ± 0,07
	FC (Batt.min ⁻¹)	111,94 ± 5,17	115,32 ± 2,51	139,63 ± 5,83†‡
	$\dot{V}E$ (L.min ⁻¹)	38,72 ± 2,96	27,93 ± 1,39 *†	40,88 ± 2,03
	Perception de l'effort	12,00 ± 0,67	9,73 ± 0,94	11,25 ± 0,83
70% max	$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)	1,99 ± 0,16	2,41 ± 0,09 *	1,80 ± 0,13
	$\dot{V}CO_2$ (L.min ⁻¹)	1,84 ± 0,14	2,52 ± 0,15 †	1,92 ± 0,19
	FC (Batt.min ⁻¹)	129,49 ± 5,00 *‡	158,14 ± 3,28	157,29 ± 6,82
	$\dot{V}E$ (L.min ⁻¹)	50,22 ± 2,76	70,42 ± 4,91 †	54,27 ± 5,13
	Perception de l'effort	15,57 ± 0,74	15,45 ± 0,71	15,00 ± 0,38

Moyenne ± ES. Différence significative par rapport aux NS : * $P<0,05$. Différence significative par rapport aux CY : † $P<0,05$. Différence significative par rapport aux JU : ‡ $P<0,05$. (CY : cyclistes, JU : judokas, NS : non-sportifs, FC : fréquence cardiaque, $\dot{V}E$: ventilation minute).



Au cours de chaque exercice de 5 minutes, l'efficacité mécanique était augmentée chez les judokas par rapport aux cyclistes ($P=0,011$ et $P=0,016$) et aux non-sportifs ($P=0,002$ et $P=0,007$) (Figure 40). La cinétique de $\dot{V}O_2$ était quant à elle accélérée chez les cyclistes par rapport aux judokas lors de l'exercice à 80 N·m ($P=0,019$), et par rapport aux judokas et aux non-sportifs lors de l'exercice à 70% max ($P=0,029$ et $P=0,001$) (Figure 41).

Figure 40 Indice d'efficacité mécanique au cours de chaque exercice chez les cyclistes ■, les judokas ■ et les non-sportifs ■. Moyenne \pm ES Différence significative par rapport aux NS : * $P<0,05$. Différence significative par rapport aux CY : † $P<0,05$.

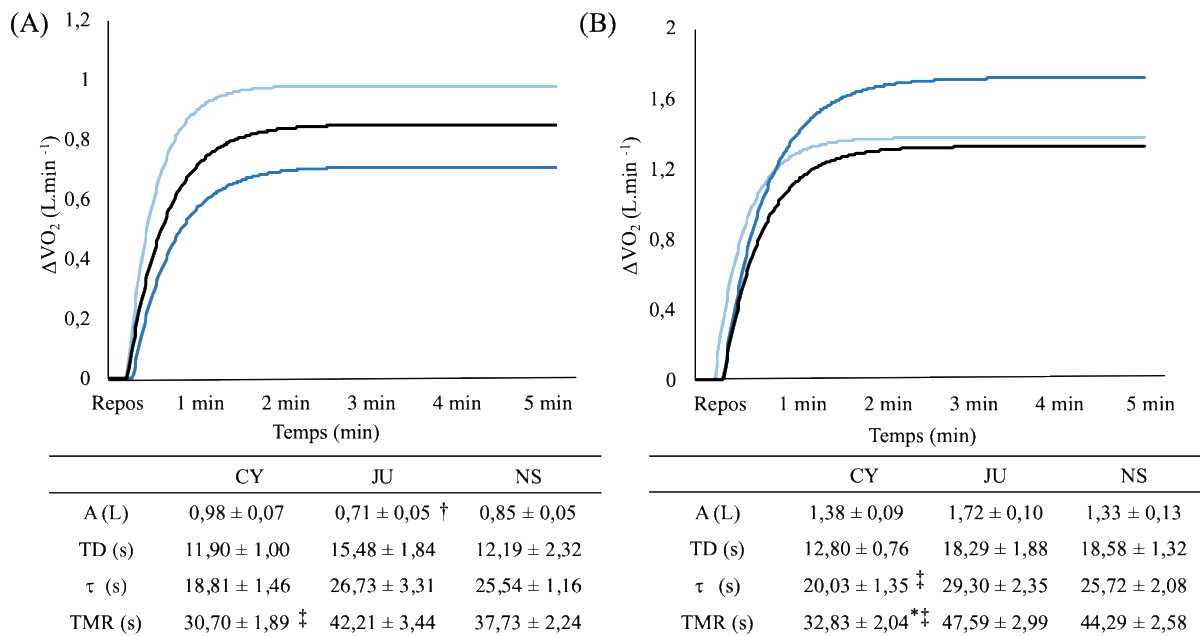


Figure 41 Cinétique de $\dot{V}O_2$ obtenue au cours de l'exercice (A) à 80 N·m et (B) à 70% max chez les cyclistes ■, les judokas ■ et les non-sportifs ■. Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport aux NS: * $P<0,05$. Différence significative par rapports aux CY: † $P<0,05$. Différence significative par rapport aux JU: ‡ $P<0,05$. (A : amplitude ; TD : temps de délai ; τ : constante de temps ; TRM : temps de réponse moyen).

Au cours de chaque exercice et pour chaque groupe, ΔHbO_2 diminuait au cours de l'exercice ($P < 0,001$), tandis que ΔHHb augmentait ($P < 0,05$), excepté chez les non-sportifs au cours de l'exercice à 70% max, chez qui ΔHHb restait inchangé ($P > 0,05$). ΔTHb diminuait en début d'exercice. Chez les cyclistes, il augmentait en fin d'exercice ($P < 0,001$) (Figure 42).

Au cours de l'exercice à 70% max, ΔHHb était supérieur chez les cyclistes par rapport aux non sportifs (3 min : $P = 0,037$, 4 min : $P = 0,029$ et 5 min $P = 0,022$), tout comme ΔTHb (4 min : $P = 0,041$ et 5 min : $P = 0,014$) (Figure 42).

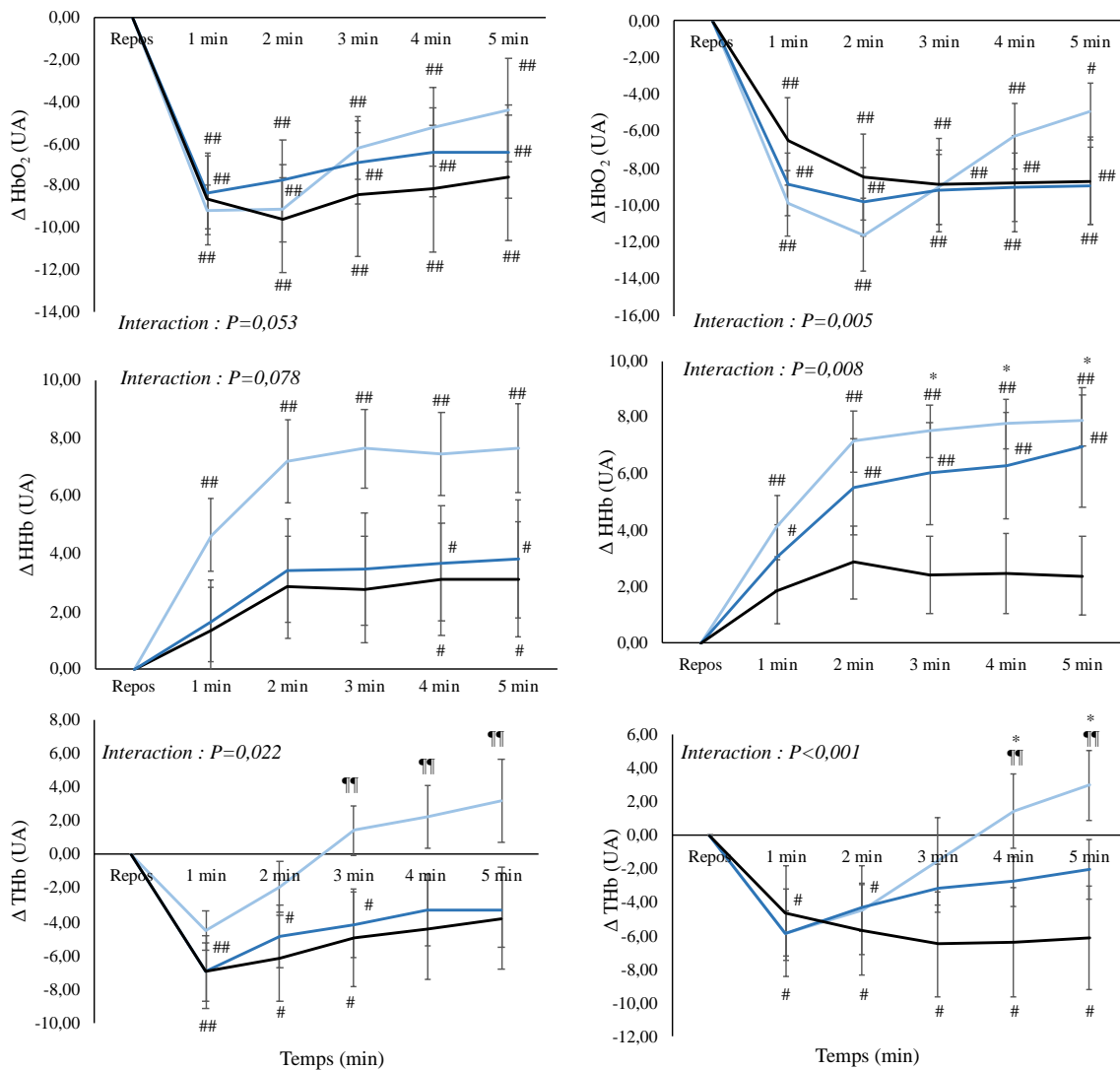


Figure 42 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb au cours de l'exercice (A) à 80 N·m et (B) à 70% max chez les cyclistes ■, les judokas ■ et les non-sportifs ■. Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport aux NS: * $P < 0,05$, Différence significative par rapport au repos : # $P < 0,05$ ## $P < 0,001$, Différence significative par rapport à 1 min : ¶ $P < 0,001$.

DISCUSSION

Les participants sportifs étaient caractérisés par une modification des réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice, qui se manifestait en fonction de la spécialité sportive, de différentes manières. Chez les cyclistes, le temps de réponse moyen de la cinétique de $\dot{V}O_2$ était diminué, tandis que ΔHHb et ΔTHb étaient augmentés. Les judokas étaient quant à eux caractérisés par un plus haut niveau d'efficacité mécanique.

Force maximale des muscles extenseurs du tronc

En accord avec les travaux de Kort & Hendriks (1992), le moment de force maximal des judokas était supérieur à celui des non-sportifs et des cyclistes. Cela suggère que l'implication spécifique des muscles du tronc dans le cadre de la pratique sportive est nécessaire pour augmenter la force des muscles extenseurs du tronc. Ces différences ont été retrouvées au cours des deux exercices isocinétiques maximaux (mode arthromoteur et mode classique). Ainsi, le mode arthromoteur pourrait être une bonne alternative au mode classique pour l'évaluation de la force maximale des muscles extenseurs du tronc.

Cinétiques d'ajustements

L'accélération des cinétiques de $\dot{V}O_2$ chez les cyclistes, suggère un ajustement physiologique plus rapide en réponse à l'exercice (Phillips et al. 1995). Cela peut être attribué à un apport en O_2 plus rapide jusqu'au compartiment musculaire ou par une accélération de l'activation des processus de phosphorylation oxydative.

L'optimisation de l'apport en O_2 résulterait de meilleures adaptations hémodynamiques à l'exercice (augmentation du flux sanguin, vasodilatation, redistribution du volume sanguin vers les muscles paravertébraux). L'amélioration des réponses hémodynamiques est encouragée par l'augmentation de ΔTHb à l'exercice (Kime et al. 2009).

L'accélération de l'activation des processus de phosphorylation oxydative résulterait d'une augmentation de capacité oxydative musculaire. Ce phénomène peut être encouragé par l'augmentation plus précoce de la désoxygénation musculaire, reflétée par l'augmentation de ΔHHb dès la première minute d'exercice, ce qui suggère une augmentation de l'extraction de l' O_2 , permise par les réponses intracellulaires relatives au métabolisme aérobie musculaire.

L'efficience mécanique

L'efficience mécanique était augmentée chez les judokas. Néanmoins, comme l'étude 1 a mis en évidence que les muscles paravertébraux n'étaient pas les seuls impliqués au cours des exercices sous-maximaux, il est difficile de déterminer si ce faible coût en O₂ qui caractérise les judokas est plutôt attribué à une meilleure efficience oxydative des muscles paravertébraux, ou plutôt à une modification du pattern de contraction musculaire, résultant d'une autre stratégie pour le contrôle lombo-pelvien.

Un pattern d'activation musculaire plus économique pourrait être spécifique aux judokas. Ce contrôle pourrait être associé à la diminution de l'implication des muscles paravertébraux, et à l'augmentation de celles des muscles des membres inférieurs pour l'extension du tronc (Van Oosterwijck et al. 2017). Aussi, la plus grande sollicitation des muscles des membres inférieurs engendrerait une redistribution du flux sanguin vers ces muscles, ce qui pourrait expliquer le manque d'adaptations hémodynamiques à l'exercice au regard des muscles paravertébraux, chez les judokas.

Conclusion

- ◆ La pratique d'activités sportives est associée à une modification des réponses hémodynamiques et/ou métaboliques au regard des muscles paravertébraux lors d'un exercice prolongé d'extension du tronc.
- ◆ Les judokas sont caractérisés par une augmentation de l'efficience mécanique à l'exercice.
- ◆ Les cyclistes sont caractérisés par une accélération de la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$, et par l'augmentation du volume sanguin et de la désoxygénation musculaire à l'exercice.

ÉTUDE 3

Réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux :
influence de la lombalgie chronique
Résultats préliminaires

**Aerobic metabolism responses to isokinetic trunk extension exercise
in chronic low back pain patients.**

Agathe Anthierens, Patrick Mucci, Nicolas Olivier, André Thevenon.
Expérimentations en cours.

CONTEXTUALISATION

La lombalgie chronique est associée à des sensations de douleur et à un haut niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux. Ces symptômes pourraient être secondaires à une altération des réponses métaboliques et/ou hémodynamiques à l'exercice, qui limiterait la contribution du métabolisme aérobie musculaire.

Cette potentielle altération, déjà suggérée dans la littérature (Kell & Bhambhani 2006b), pourrait simplement être secondaire au déconditionnement physique des patients, résultant de la diminution des activités quotidiennes (Kell & Bhambhani 2006a) fréquemment observée chez les lombalgiques chroniques.

L'objectif de cette étude est de déterminer la spécificité des réponses aérobies musculaires lors d'un exercice sollicitant les muscles paravertébraux chez des sujets souffrant de lombalgie chronique par rapport à des sujets sains, dont le niveau d'activité physique est similaire.

L'hypothèse est que les muscles paravertébraux des lombalgiques chroniques seront plus faibles et plus fatigables que ceux des sujets contrôles. Malgré un niveau de pratique d'activités physiques équivalent, les lombalgiques chroniques seront caractérisés par de moins bonnes adaptations du métabolisme aérobie au regard des muscles paravertébraux (cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ plus lente, plus faible niveau d'efficacité mécanique, de désoxygénation et de volume sanguin musculaire à l'exercice).

METHODES

Participants

Vingt-huit lombalgiques chroniques ont été inclus pour cette étude. Ils étaient recrutés à l'hôpital Swynghedauw (Lille, France) dans le service de médecine physique et de réadaptation fonctionnelle. Pour être inclus, les patients devaient être âgés entre 18 et 55 ans, souffrir de douleurs lombaires depuis au moins 3 mois et être aptes à la pratique d'exercices physiques.

Chacun devait être apparié en âge, poids, sexe et niveau d'activité physique avec un volontaire sain. Pour le moment, dix patients ont été appariés à un sujet contrôle. L'un d'eux n'a pas effectué l'ensemble du protocole. Par conséquent, seules les données relatives à neuf lombalgiques chroniques et neuf sujets contrôles ont été analysées à ce jour (*Tableau 12*).

Tableau 12 Caractéristiques des participants de l'étude 3.

	Lombalgiques	Contrôles
Sexe (H/F)	6/3	6/3
Âge (années)	42,6 ± 2,1	41,1 ± 2,3
Masse corporelle (kg)	70,3 ± 4,1	68,5 ± 4,0
Taille (m)	1,74 ± 0,03	1,71 ± 0,02

Moyenne ± ES. (H : homme ; F : femme).

Plan de l'étude

Après avoir vérifié qu'ils correspondaient bien aux critères d'inclusions et de non inclusions, les sujets ont effectué un test de Sorensen pour évaluer la fatigabilité des muscles extenseurs du tronc à l'exercice, et ils ont rempli des questionnaires pour évaluer leur niveau d'activité physique (questionnaire de Baecke) et de qualité de vie (questionnaire SF-36) (Figure 43).

Lors d'une autre visite, ils ont réalisé les exercices isocinétiques en mode arthromoteur (un exercice maximal et deux exercices sous-maximaux). Pendant les exercices sous-maximaux, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}E$, l'oxygénation des muscles paravertébraux, la perception de l'effort et les sensations de douleur étaient évalués, par l'utilisation d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires, de la spectroscopie proche infrarouge, de l'échelle de Borg et d'une échelle visuelle analogique.

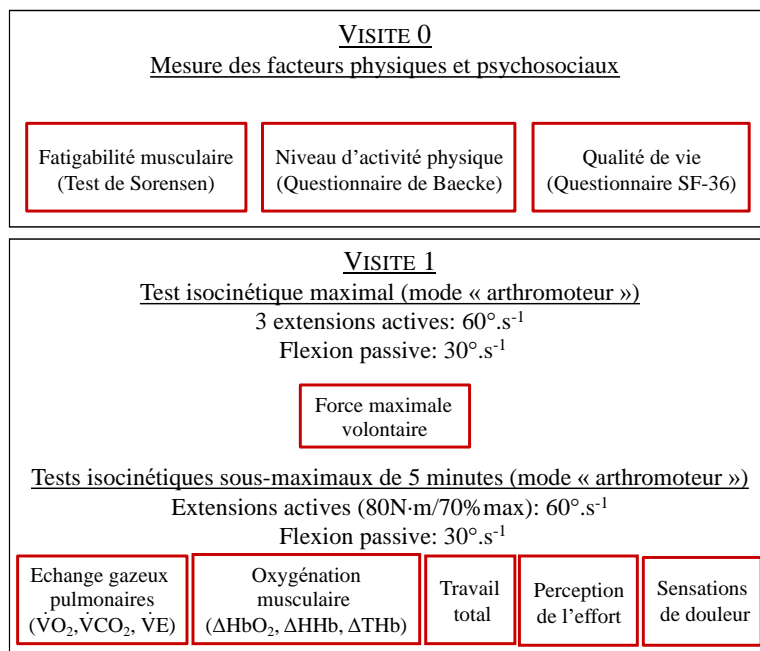


Figure 43 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 3.

RESULTATS PRINCIPAUX

Comparaison des facteurs physiques

Le temps de maintien au test de Sorensen et le moment de force développé au cours d'une extension maximale du tronc étaient inférieurs chez les lombalgiques chroniques par rapport aux sujets contrôles ($P=0,003$ et $P=0,019$) (Figure 44).

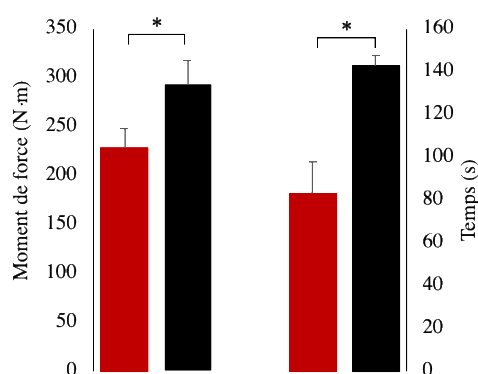


Figure 44 Moment de force développé sur une extension du tronc maximale et temps de maintien au test de Sorensen chez les lombalgiques chroniques ■ et les sujets contrôles ■. Moyenne \pm ES. Différence significative : * $P < 0,05$.

Comparaison des facteurs psychosociaux

Le niveau de la qualité de vie était inférieur chez les lombalgiques chroniques par rapport aux sujets contrôles ($P < 0,001$). Les scores obtenus au questionnaire de Baecke (niveau d'activité physique dans le cadre de l'activité professionnelle, dans les activités sportives et dans les activités de loisir) n'étaient pas différents entre les groupes (Figure 45).

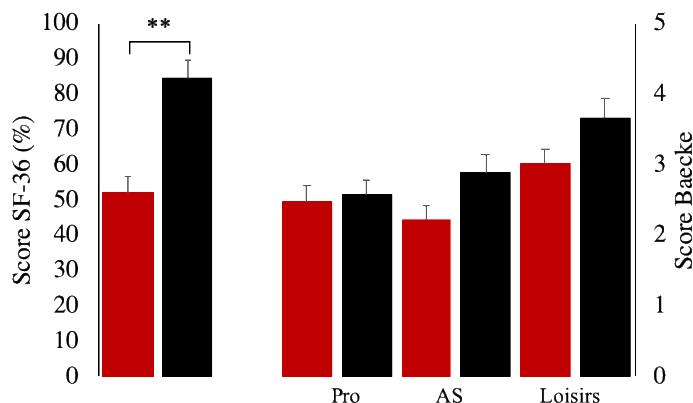


Figure 45 Scores obtenus au questionnaire SF-36 (score global) et au questionnaire de Baecke chez les lombalgiques chroniques ■ et les sujets contrôles ■. Moyenne \pm ES. Différence significative : ** $P < 0,001$. (Pro : activité professionnelle ; AS : activités sportives.)

Sensations de douleur

Après chaque exercice, l'intensité des sensations de douleur étaient augmentées uniquement chez les lombalgiques ($P=0,001$ et $P=0,047$).

Les sensations de douleur étaient supérieures chez les lombalgiques par rapport aux contrôles, avant et après chaque exercice ($P<0,05$) (*Figure 46*).

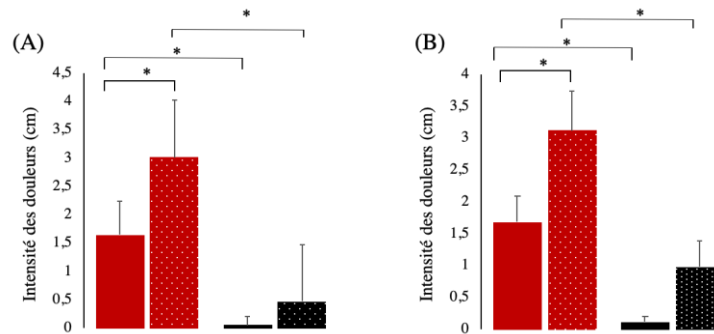


Figure 46 Douleurs ressenties dans le bas du dos chez les lombalgiques chroniques ■ et les sujets contrôles ■, avant □ et après □ l'exercice (A) à 80 N·m et (B) à 70% max. Moyenne ± ES. Différence significative : * $P<0,05$.

Réponses métaboliques et hémodynamiques au cours des exercices sous-maximaux

Au cours de chaque exercice, il n'y avait pas de différence entre les groupes concernant le travail total, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$, FC, MRT, A, τ , et l'efficacité mécanique (Tableau 13). Toutefois, la perception de l'effort était supérieure chez les lombalgiques chroniques au cours de l'exercice à 80 N·m (P=0,009).

Tableau 13 Travail total, réponses cardiorespiratoires, efficacité mécanique et perception de l'effort des lombalgiques chroniques et des sujets contrôles au cours de chaque exercice.

Variables	Lombalgiques	Contrôles	P	
Exercice 80 N·m	Travail total (J)	6152,22 ± 188,71	6533,22 ± 141,20	0,226
	$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)	1,38 ± 0,08	1,28 ± 0,05	0,374
	$\dot{V}CO_2$ (L.min ⁻¹)	1,30 ± 0,06	1,32 ± 0,06	0,732
	A (L.min ⁻¹)	1,04 ± 0,09	0,93 ± 0,04	0,582
	TD (s)	17,59 ± 4,47	12,05 ± 4,00	0,377
	τ (s)	43,16 ± 5,94	41,27 ± 3,57	0,644
	TRM (s)	60,74 ± 7,07	53,33 ± 5,39	0,457
	FC (Batt.min ⁻¹)	134,44 ± 9,10	142,04 ± 7,67	0,179
	$\dot{V}E$ (L.min ⁻¹)	44,31 ± 4,17	43,36 ± 2,22	0,904
	Efficacité mécanique (%)	4,36 ± 0,22	4,81 ± 0,6	0,116
	Perception de l'effort	15,11 ± 0,68	12,56 ± 0,88	0,009
	Exercice 70% max	Travail total (J)	6808,78 ± 521,58	7706,78 ± 506,18
$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)		1,44 ± 0,07	1,54 ± 0,13	0,457
$\dot{V}CO_2$ (L.min ⁻¹)		1,39 ± 0,09	1,70 ± 0,16	0,095
A (L.min ⁻¹)		1,17 ± 0,11	1,08 ± 0,06	0,453
TD (s)		10,50 ± 2,23	11,86 ± 3,92	0,503
τ (s)		46,20 ± 3,58	42,49 ± 7,64	0,557
TRM (s)		56,70 ± 3,84	54,34 ± 5,23	0,772
FC (Batt.min ⁻¹)		136,16 ± 6,19	154,02 ± 7,93	0,081
$\dot{V}E$ (L.min ⁻¹)		49,16 ± 2,28	54,12 ± 7,34	0,550
Efficacité mécanique (%)		4,48 ± 0,22	4,74 ± 0,33	0,385
Perception de l'effort		15,11 ± 0,48	14,33 ± 1,11	0,510

Moyenne ± ES. (A : amplitude ; TD : temps de délai ; τ : constante de temps ; TRM : temps de réponse moyen ; FC : fréquence cardiaque, $\dot{V}E$: débit ventilatoire).

Au cours de l'exercice à 80 N·m, ΔHbO_2 diminuait dans les deux groupes ($P<0,05$). Au cours de l'exercice à 70%max, ΔHbO_2 diminuait dans les deux groupes et ΔTHb diminuait uniquement dans le groupe de sujets sains (Figure 47). Il n'y avait aucune différence entre les deux groupes.

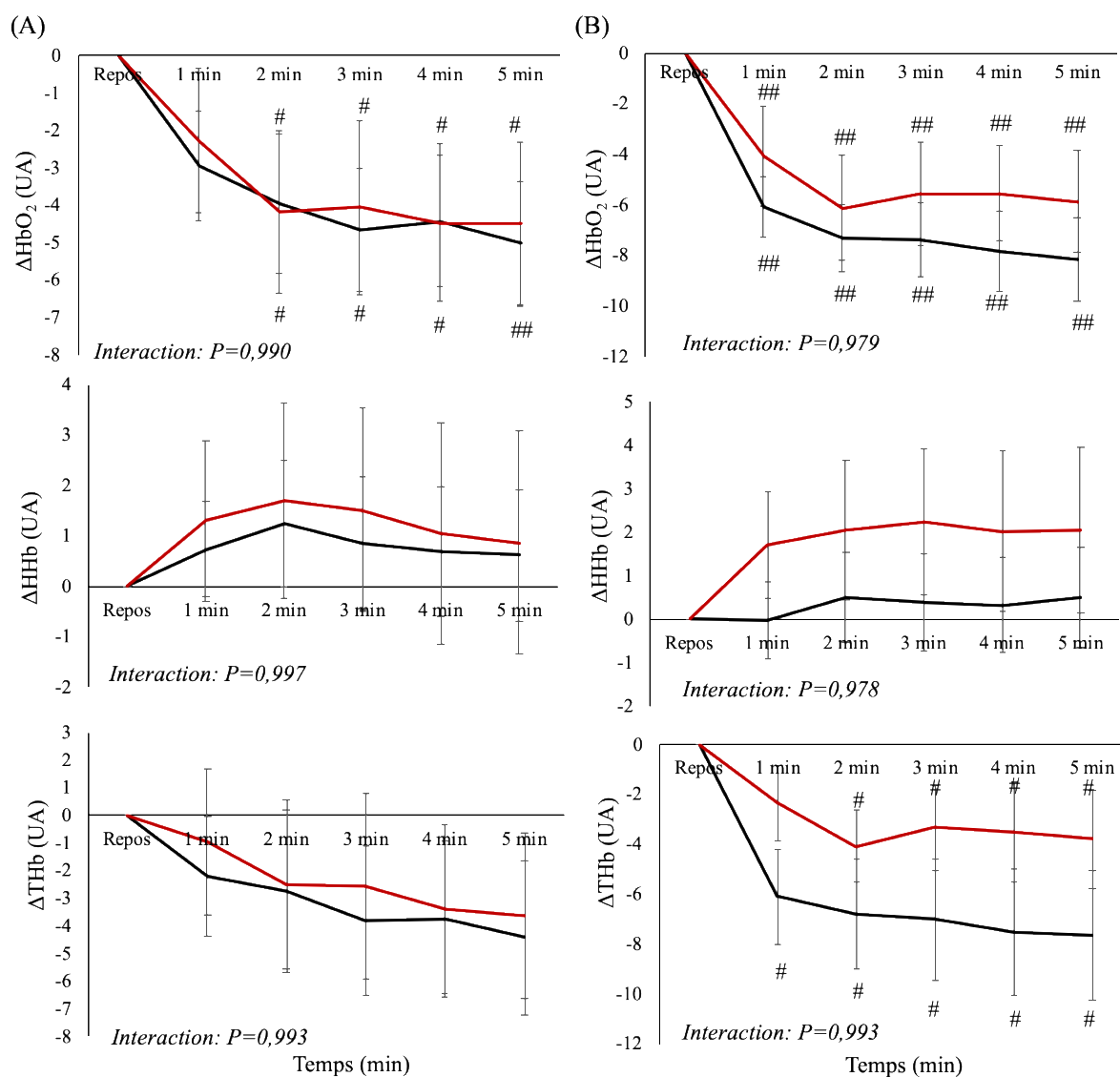


Figure 47 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb chez les lombalgiques chroniques ■ et chez les sujets contrôles ■ au cours de l'exercice (A) à 80 N·m et (B) à 70%max. Moyenne \pm E.S. Différence significative par rapport au repos : # $P<0,05$ ## $P<0,001$.

DISCUSSION

Les résultats préliminaires nous indiquent que les muscles extenseurs du tronc des lombalgiques chroniques sont plus fatigables et moins forts que ceux des sujets sains, en dépit de niveaux de pratique d'activités physiques équivalents. Les lombalgiques chroniques sont aussi caractérisés par une moins bonne tolérance à l'effort au cours de l'exercice à 80 N·m.

Néanmoins, cette faiblesse et cette fatigabilité musculaire ne sont pas associées à une altération des réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice au cours de 5 minutes. L'altération des réponses aérobies déjà suggérée dans d'autres études pourrait alors être attribuée au faible niveau d'activité (Kell & Bhambhani 2006a).

Ces résultats doivent toutefois être considérés avec précaution, puisque la taille des échantillons est pour le moment très faible. Le recrutement des participants mérite d'être poursuivi.

Conclusion

- ◆ Les patients lombalgiques chroniques seraient caractérisés par un haut niveau de fatigabilité et un faible niveau de force maximale des muscles extenseurs du tronc.
- ◆ Chez les lombalgiques chroniques, les réponses hémodynamiques et métaboliques au regard des muscles paravertébraux, au cours d'un exercice prolongé d'extension du tronc, seraient similaires à celles de sujets sains appariés.

ÉTUDE 4

Bénéfices d'un programme de restauration fonctionnelle
de 4 semaines chez les lombalgiques chroniques et suivi à 3 mois

**Benefits of a four-week functional restoration program in chronic low back
pain patients and three-month follow-up: focus on paraspinal muscle
aerobic metabolism responses to exercise**

Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. *Article en
cours de soumission.*

CONTEXTUALISATION

Les programmes de restauration fonctionnelle sont reconnus comme étant plus efficaces que les soins médicaux traditionnels pour diminuer les symptômes associés à la lombalgie chronique (Kamper et al. 2015). Ces programmes consistent en un traitement multidisciplinaire des patients, à travers une prise en charge physique, psychologique et comportemental avec l'exercice physique comme principale composante (Mayer & Gatchel 1988).

Ce type de programme a déjà été associé à la diminution des sensations de douleur siégeant dans le bas du dos et à un haut niveau de fatigabilité musculaire à l'exercice. Cela pourrait résulter d'un meilleur équilibre entre les besoins et l'utilisation de l'O₂ en fin de programme. En effet, le réentraînement physique pourrait permettre ce type d'amélioration, comme l'entraînement sportif des sujets sains le permet (Murias et al. 2010).

Les bénéfices des programmes ne sont pas toujours conservés à long terme (Verfaillie et al. 2005) et la reprise de l'activité professionnelle (qui est un reflet du succès de la prise en charge) est loin d'être systématique (Poulain et al. 2010). Aujourd'hui, les facteurs associés au maintien des bénéfices et à la reprise de l'activité professionnelle sont mal définis. La qualité des réponses aérobies à l'exercice mérite d'être considérée comme potentiel facteur.

L'objectif de cette étude était de déterminer les effets d'une période de restauration fonctionnelle du rachis de 4 semaines sur les réponses du métabolisme aérobie et de l'hémodynamisme des muscles paravertébraux, puis de déterminer si trois mois après le programme, les bénéfices étaient préservés, et s'ils étaient associés à la reprise de l'activité professionnelle. L'hypothèse était que les réponses du métabolisme aérobie musculaire seraient améliorées à la fin du programme de restauration fonctionnelle du rachis, et que 3 mois après le retour à domicile, le maintien des bénéfices serait associé à la reprise de l'activité professionnelle.

METHODES

Participants

Vingt-trois des patients inclus dans l'étude 3 ont été réévalués après un séjour de 4 semaines de restauration fonctionnelle. Toutefois, seuls vingt-deux patients ont été retenus pour cette étude (*Tableau 14*). Les données du vingt-troisième patient n'ont pas été conservées pour l'analyse des données, car il n'avait pas un niveau de force musculaire suffisant pour effectuer le protocole d'exercices isocinétiques sous-maximaux en intégralité.

Douze participants ont été réévalués 3 mois après le retour à domicile. Les autres ont quitté l'étude suite à un rendez-vous manqué, des sensations de douleur trop intenses, une indisponibilité du matériel, un retrait du contentement ou à des contraintes horaires.

Tableau 14 Caractéristiques des participants de l'étude 4.

	P1 vs P2	P3
Sexe (H/F)	11/11	6/6
Âge (années)	41,6 ± 1,8	40,7 ± 2,6
Taille (m)	1,74 ± 0,02	1,71 ± 0,02
Masse corporelle (kg)	73,7 ± 3,1	68,7 ± 2,9

Moyenne ± ES. (H : homme ; F : femme ; P1/P2/P3 : Période d'évaluation 1, 2, 3).

Plan de l'étude

Après la visite d'inclusion, les patients ont été évalués au début (P1) et à la fin du programme de réadaptation fonctionnelle (P2). Ils étaient convoqués trois mois après le retour à domicile pour effectuer une visite de contrôle (P3).

Au cours de chaque période, les patients effectuaient une visite pour évaluer les facteurs psychosociaux et physiques à partir de questionnaires et de tests physiques (*Figure 48*) :

- Les capacités fonctionnelles (Échelle EIFEL, Coste et al. 1993).
- La répercussion de la lombalgie sur le mode de vie (Questionnaire de DALLAS, Marty et al. 1998).
- L'anxiété et la dépression (Questionnaire HAD, Lépine et al. 1985)
- Les peurs, croyances, et attitudes d'évitement (Questionnaire FABQ, Chaory et al. 2004).
- La qualité de vie (Questionnaire SF – 36, Perneger et al. 1995).
- Le niveau d'activité physique (Questionnaire de Baecke, Bigard et al. 1992).
- La fatigabilité des muscles extenseurs du tronc (Test de Sorensen, Biering-Sørensen 1984).

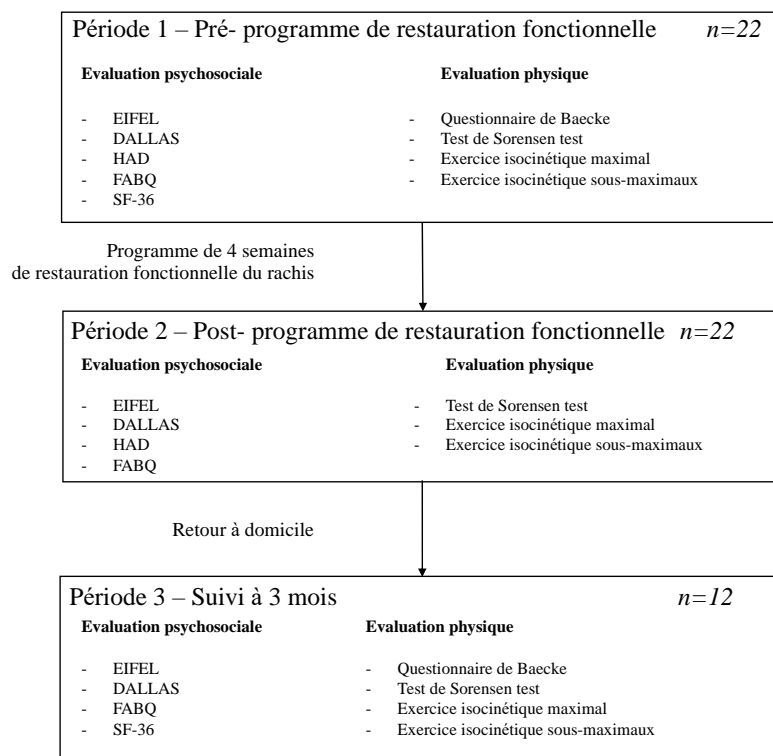


Figure 48 Plan de l'étude 4.

Au cours d'une autre visite, les patients réalisaient les exercices isocinétiques en mode arthromoteur (un maximal et deux sous-maximaux) (*Figure 49*). Pendant les exercices sous-maximaux, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ et $\dot{V}E$, l'oxygénation des muscles paravertébraux, la perception de l'effort et les sensations de douleur étaient évalués, par l'utilisation d'un analyseur des échanges gazeux pulmonaires, de la spectroscopie proche infrarouge, de l'échelle de Borg et d'une échelle visuelle analogique.

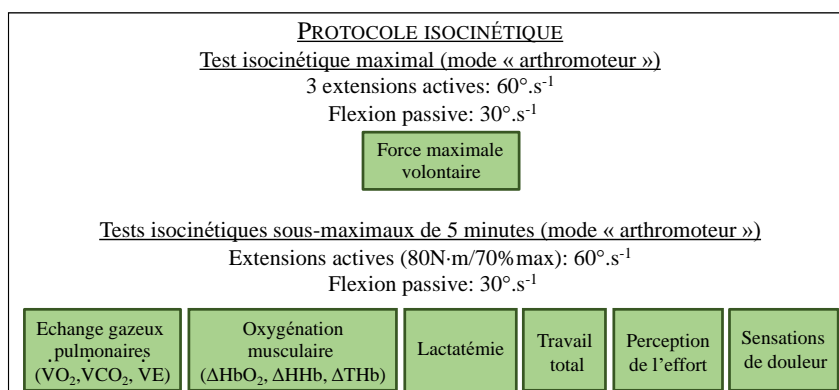


Figure 49 Résumé du protocole isocinétique et des mesures effectuées dans le cadre de l'étude 4.

Au cours de ces expérimentations, nous avons observé que le travail développé entre l'exercice à 80 N·m et l'exercice à 70%max n'était pas statistiquement différent, à aucune des périodes d'évaluation (P1- 80 N·m: 6011,1 ± 176,0 – 70% max : 6188,3 ± 458,4 ; P2 - 80 N·m : 6382,2 ± 164,7 – 70%max : 6783,4 ± 474,5; P3 - 80 N·m : 6038,9 ± 297,4 – 70%max 6458,7 ± 938,2). C'est pourquoi, nous avons décidé de focaliser la présentation des résultats sur les données récoltées au cours de l'exercice à 80 N·m. De cette manière, il est possible d'évaluer les modifications des réponses aérobies entre les différentes périodes d'évaluation, au cours d'un exercice aux consignes strictement similaires.

RESULTATS

Comparaison entre P1 et P2

Facteurs physiques et psychosociaux

À P2, Le temps de maintien au test de Sorensen était augmenté par rapport à P1 ($P < 0,001$), contrairement au moment de force maximal développé par les muscles extenseurs du tronc qui restait inchangé (*Figure 50*).

Les scores obtenus aux questionnaires HAD-Anxiété, EIFEL, Dallas, et FABQ, étaient améliorés ($P < 0,05$) (*Tableau 15*).

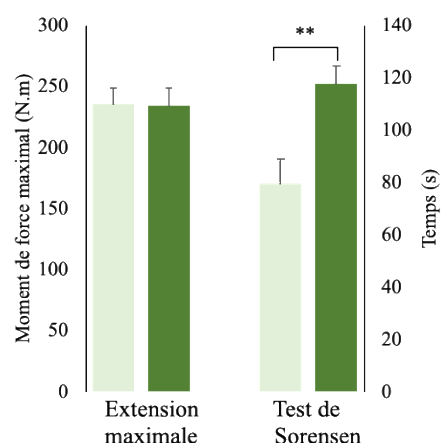


Figure 50 Moment de force maximal développé par les muscles extenseurs et tronc et temps de maintien au test de Sorensen au début (■) et à la fin (■) du programme. Moyenne ± E.S. Différence significative : ** $P < 0,001$).

Tableau 15 Évolution des facteurs psychosociaux entre le début et à la fin du programme.

	P1	P2	P
EIFEL	11,24 ± 0,76	5,57 ± 0,83	< 0,001
Dallas – AQ	67,20 ± 2,58	40,35 ± 4,96	< 0,001
Dallas - APro/L	67,30 ± 4,41	39,25 ± 5,74	< 0,001
Dallas – PSY	52,50 ± 5,87	28,75 ± 5,09	< 0,001
Dallas – SOCIAL	43,00 ± 4,27	27,25 ± 4,27	< 0,001
FABQ – APro	13,60 ± 1,35	7,45 ± 1,39	< 0,001
FABQ – AP	21,60 ± 2,43	17,10 ± 3,05	0,030
HAD-Anxiété	9,24 ± 0,72	7,38 ± 0,76	0,008
HAD-Dépression	6,48 ± 0,81	5,57 ± 0,96	0,209

Moyenne ± ES. (P1 : Période 1 ; P2 : Période 2 ; AQ : Activité quotidienne ; L : loisir ; PSY : état psychologique ; SOCIAL : sociabilité ; APro : activité professionnelle ; AP : activité physique).

Sensations de douleur à l'exercice sous-maximal

À P1, les sensations de douleur étaient augmentées à la fin de l'exercice sous-maximal, tandis qu'elles restaient inchangées à P2. En fin d'exercice, les sensations de douleur étaient supérieures à P1 par rapport à P2 (*Figure 51*).

La perception de l'effort en fin d'exercice n'était quant à elle pas modifiée (P1 : 15,43 ± 0,09 vs P2 : 14,05 ± 0,13) (*Figure 52*).

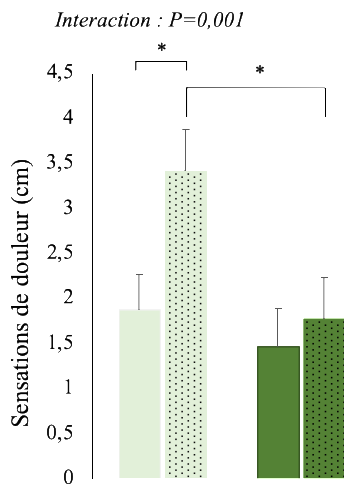


Figure 51 Douleurs ressenties dans le bas du dos au début et à la fin du programme, avant et après l'exercice sous-maximal. Moyenne ± ES. Différence significative : * $P<0,05$.

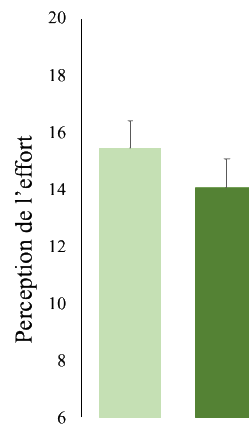
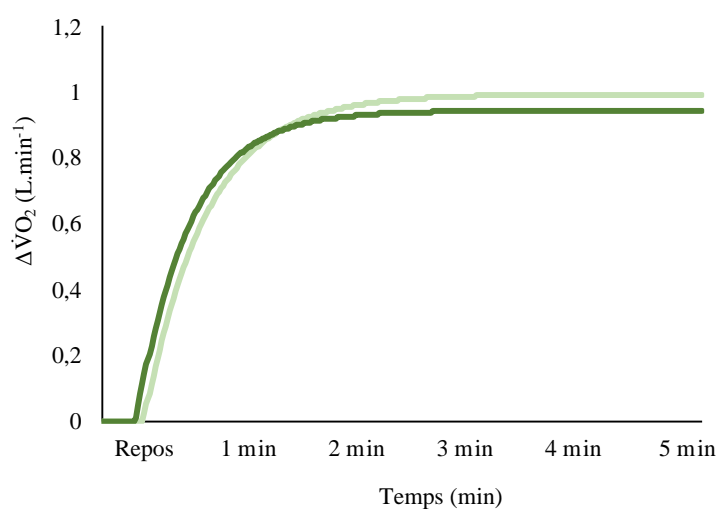


Figure 52 Perception de l'effort en fin d'exercice au début et à la fin du programme. Moyenne ± ES.

Réponses métaboliques et hémodynamiques à l'exercice

L'analyse de la cinétique de $\dot{V}O_2$ a révélé une diminution de τ à P2 par rapport à P1 ($P=0,036$) sans évolution significative de A ou de TD (Figure 53), ni de la fréquence cardiaque ou du débit ventilatoire en fin d'exercice. L'efficacité mécanique était quant à elle augmentée à P2 ($P=0,008$) et l'augmentation de la lactatémie à l'exercice était moindre ($P=0,048$) (Figure 54).



	P1	P2
A (L)	0,99 ± 0,05	0,94 ± 0,04
TD (s)	21,22 ± 2,15	17,56 ± 1,51
τ (s)	31,14 ± 1,88	26,41 ± 1,19 *
TRM (s)	52,35 ± 3,71	43,97 ± 2,12

Figure 53 Cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ au cours de l'exercice sous-maximal, au début (P1) ■ et à la fin (P2) ■ du programme. Moyenne ± E.S. Différence significative : * $P<0,05$.

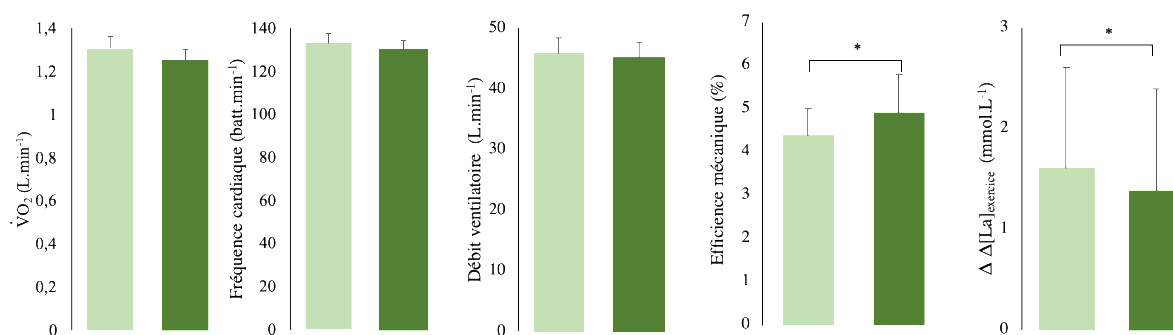


Figure 54 $\dot{V}O_2$, fréquence cardiaque, débit ventilatoire, efficacité mécanique et augmentation de la lactatémie à l'exercice au début ■ et à la fin ■ du programme. Moyenne ± ES. Différence significative : * $P<0,05$.

A P1, les données récoltées par la NIRS ont révélé que ΔTHb et ΔHbO_2 diminuait au cours de l'exercice. A P2, seul ΔHbO_2 diminuait de manière significative, tandis que ΔTHb ne variait pas par rapport aux valeurs de repos. A P2, ΔHHb était significativement plus élevé en fin d'exercice par rapport à P1 (Figure 55).

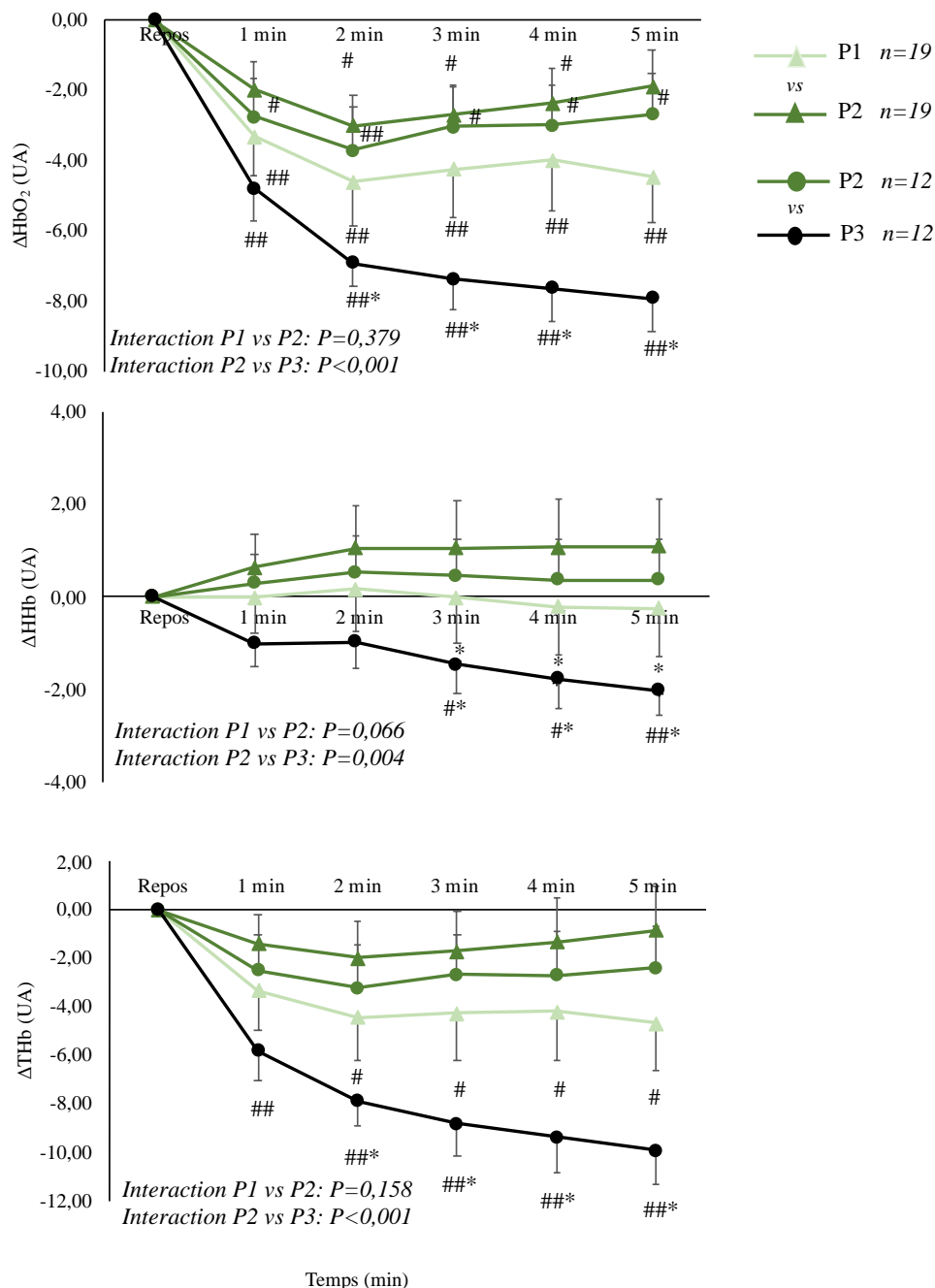


Figure 55 Évolution de ΔHbO_2 , ΔHHb et ΔTHb au cours de l'exercice sous-maximal au début (P1), à la fin (P2) et 3 mois après (P3) le programme de restauration fonctionnelle du rachis. Moyenne \pm ES. Différence significative par rapport à P2: * $P<0,05$. Différence significative par rapport au repos : # $P<0,05$ ## $P<0,001$.

Suivi à 3 mois

Facteurs physiques et psychosociaux

Il n'y avait aucune différence entre les résultats aux questionnaires distribués à P2 et P3, ni entre les temps de maintien au test de Sorensen et les moments de force maximal (*Tableau 16*).

Les scores au questionnaire SF-36 étaient augmentés à P3 par rapport à P1 ($P < 0,05$), tout comme le score relatif au niveau de pratique d'activités sportives, calculé à partir du questionnaire de Baecke ($P = 0,039$) (*Figure 56*). Néanmoins, 66,7% des patients pratiquaient moins de deux heures d'activités physiques à intensité modérée chaque semaines à P3.

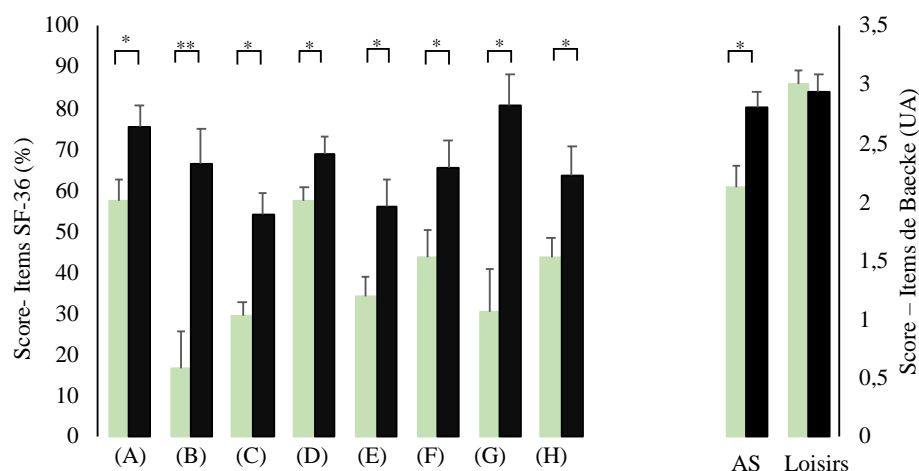


Figure 56 Scores obtenus aux questionnaires de Baecke et SF-36 avant ■ et 3 mois ■ après Le programme. Moyenne \pm ES. Différence significative : * $P < 0,05$ ** $P < 0,001$. (A : activité physique ; B : limitations physiques ; C : douleurs physiques ; D : perception de la santé globale ; E : vitalité ; F : fonctionnement social ; G : limitations émotionnelles ; H : santé mentale ; AS : activités sportives).

Sensations de douleur à l'exercice sous-maximal

Il n'y avait aucun changement observé quant aux sensations de douleur évaluées avant et après l'exercice entre P2 et P3 (*Tableau 16*).

Réponses métaboliques à l'exercice

L'efficacité mécanique et les variables relatives à la cinétique de $\dot{V}O_2$ n'étaient pas différentes entre P1 et P2. Toutefois, ΔHbO_2 , ΔHHb , et ΔTHb étaient inférieurs à P3 par rapport à P2 ($P < 0,05$) (*Figure 55*). La perception de l'effort était inchangée.

Tableau 16 Évolution des facteurs psychosociaux, physiques, et des réponses à l'exercice sous-maximal entre la fin du programme et 3 mois après le retour à domicile.

	P2	P3	P
<i>Facteurs psychosociaux</i>			
EIFEL	6,18 ± 1,19	4,82 ± 1,10	0,410
Dallas – AQ	40,91 ± 7,58	40,18 ± 6,11	0,909
Dallas - APro/L	45,45 ± 8,32	41,82 ± 5,59	0,677
Dallas – PSY	32,27 ± 7,64	33,64 ± 8,29	0,866
Dallas – SOCIAL	31,36 ± 6,11	28,64 ± 6,03	0,674
FABQ – Pro	21,18 ± 4,49	22,36 ± 4,03	0,688
FABQ – AP	7,36 ± 2,03	5,36 ± 1,74	0,625
<i>Facteurs physiques</i>			
Moment de force maximal (N·m)	244,43 ± 21,30	231,61 ± 22,03	0,253
Test de Sorensen (s)	107,56 ± 12,02	95,78 ± 9,11	0,373
<i>Pratique d'activités physiques (intensité modérée) par semaine</i>			
> 2 heures (%)	NA	33,33	
< 2 heures (%)	NA	66,66	
<i>Réponses à l'exercice sous-maximal</i>			
Douleur pré-exercice (cm)	1,18 ± 0,46	0,93 ± 0,52	0,274
Douleur post-exercice (cm)	1,44 ± 0,47	1,40 ± 0,57	0,274
Efficiéce mécanique (%)	4,86 ± 0,20	4,89 ± 0,26	0,189
A (L.min ⁻¹)	0,94 ± 0,05	0,91 ± 0,05	0,349
TD (s)	14,10 ± 2,09	18,79 ± 1,31	0,066
τ (s)	25,55 ± 1,66	26,81 ± 0,94	0,389
TRM (s)	39,64 ± 2,72	45,60 ± 2,04	0,055
VO ₂ (L.min ⁻¹)	1,20 ± 0,05	1,14 ± 0,05	0,178
Fréquence cardiaque (b.min ⁻¹)	133,03 ± 4,35	128,16 ± 5,76	0,342
Débit ventilatoire (L.min ⁻¹)	45,34 ± 3,81	42,17 ± 3,03	0,041
ΔLactatémie (mmol.L ⁻¹)	1,48 ± 0,24	1,08 ± 0,34	0,309
Perception de l'effort	14,18 ± 0,92	13,91 ± 1,01	0,518

Moyenne ± ES. (P2/P3 : Période 2, 3 ; A : amplitude ; TD : temps de délai ; τ : constante de temps ; TRM : temps de réponse moyen ; AQ : activité quotidienne ; APro : activité professionnelle ; L : loisir ; PSY : condition psychologique ; SOCIAL : sociabilité ; AP : activité physique ; NA : Non applicable).

Facteurs associés à la reprise de l'activité professionnelle

Lors de la visite de suivi à 3 mois, 6 patients avaient repris leur activité professionnelle (T), tandis que les 6 autres étaient toujours en arrêt, en attente de reconversion ou d'aménagement de leur poste (NT). Le niveau d'activité physique associé à l'activité professionnelle était supérieur chez les NT ($P=0,003$). Ces derniers étaient également caractérisés par un score supérieur au questionnaire FABQ-Pro (rempli à P2) ($P=0,05$) (Figure 57).

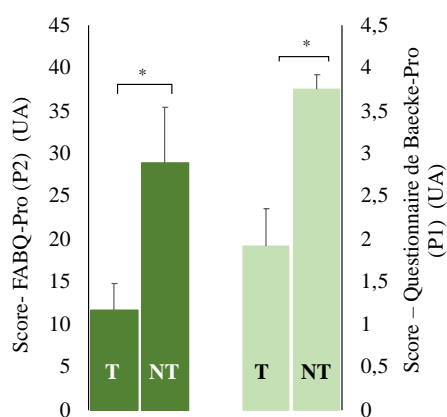


Figure 57 Scores obtenus aux questionnaires FABQ-Pro (rempli à P2) ■ et Baecke-Pro (rempli à P1) ■, chez les patients ayant repris leur activité professionnelle (T) et ceux n'ayant pas repris leur activité professionnelle (NT) lors de la visite de suivi à 3 mois. Moyenne ± ES. Différence significative: * $P<0,05$; ** $P<0,001$.

DISCUSSION

Effets d'un programme de restauration fonctionnelle

A la fin du programme, le niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux était diminué, et les sensations de douleur logeant dans le bas du dos n'étaient plus exacerbées par l'exercice isocinétique de 5 minutes. D'autres part, la condition psychosociale des individus était améliorée, grâce à la diminution de la kinésiophobie, de l'anxiété, et de l'augmentation de la perception des capacités.

Lors de l'exercice sous-maximal d'extension du tronc de 5 minutes, la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$ était accélérée, l'efficacité mécanique était augmentée, l'augmentation de la lactatémie était moindre et la diminution du volume sanguin par rapport aux valeurs de repos à l'exercice n'apparaissait plus. Ces éléments témoignent de l'amélioration de la contribution aérobie à l'exercice, qui pourraient être permise par la pratique d'activités physiques (Murias et al. 2010) .

Suivi des bénéfices à 3 mois post-programme

Trois mois après le programme, le niveau de qualité de vie des participants était augmenté, par rapport à avant le programme. La plupart des bénéfices physiques et psychosociaux permis par le programme étaient préservés, exceptée l'oxygénation musculaire pendant l'exercice sous-maximal, comme montré à travers la diminution de ΔHb , ΔHbO_2 et ΔTHb à P3 par rapport à P2. Cela pourrait être un premier signe de la perte des bénéfices. Cette perte des bénéfices pourrait être associée au trop faible niveau de pratique physique lors des trois mois post-programme. Bien que le niveau de pratique d'activités physiques était augmenté, huit individus sur douze ne respectaient pas les recommandations faites par l'Organisation Mondiale de la Santé lors de la visite de suivi à trois mois (pratiquer au moins 150 minutes d'activités physiques à intensité modérée chaque semaine) (Vuillemin 2011). De plus, les d'activités déclarées par les sujets consistaient essentiellement à effectuer des exercices en autonomie, à domicile, pendant leur temps libre. Ces activités étaient de faible intensités, irrégulières et non-structurées. Adhérer à une activité physique structurée et régulière pourrait être un moyen de préserver davantage les bénéfices du programme (Saubade et al. 2016).

Facteurs associés à la reprise de l'activité professionnelle

Lors de la visite de suivi à trois mois, la moitié des participants avaient repris leur activité professionnelle. La comparaison des différentes variables mesurées au cours des différentes périodes d'évaluation entre les travailleurs et les non travailleurs a révélé que cette reprise n'était pas associée à des facteurs physiques. Toutefois, les sujets qui avaient repris leur métier présentaient un plus faible score au questionnaire FABQ-Pro, c'est-à-dire qu'ils avaient moins de croyances kinésiophobiques. De plus, ils avaient un métier associé à un plus faible niveau d'activité physique.

Les conditions de travail des patients, et plus particulièrement le niveau d'activité physique associé à la profession, devraient être pris en considération plus précocement pour anticiper des actions ergonomiques ou des ajustements du poste de travail. Cela pourrait permettre de réduire le temps d'inactivité des patients après un programme de restauration fonctionnelle.

Conclusion

- ◆ Chez les lombalgiques chroniques, un programme de restauration fonctionnelle peut supprimer l'exacerbation des sensations de douleur à l'exercice.
- ◆ La fatigabilité musculaire et les réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice sont améliorées à la fin d'un séjour de restauration fonctionnelle du rachis mais les bénéfices relatifs aux réponses aérobies ne sont que partiellement préservées trois mois après le retour à domicile.
- ◆ La reprise de l'activité professionnelle était associée à des facteurs psychosociaux.

PARTIE 6

DISCUSSION GENERALE

L'objectif de cette thèse était d'évaluer les réponses hémodynamiques et métaboliques des muscles paravertébraux dans différentes populations, au cours d'exercices sous-maximaux d'extension du tronc. A travers ces évaluations, le but était de mieux comprendre la spécificité des réponses au regard de ces muscles et de déterminer si ces dernières étaient impactées par la lombalgie chronique d'une part, et par la pratique d'activités physiques d'autre part.

I) Considération méthodologique : le « mode arthromoteur »

L'objectif du protocole était de mettre en place des exercices communs pour toutes les populations évaluées dans nos études. Ce protocole devait permettre l'évaluation de la force des muscles paravertébraux lors d'un exercice maximal d'extension du tronc et la sollicitation du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux cours d'exercices sous-maximaux.

1. L'exercice maximal

A notre connaissance, aucune étude n'a proposé un protocole d'exercices maximaux en mode arthromoteur pour l'évaluation de la force des muscles extenseurs du tronc, qui présente pourtant des avantages par rapport à un protocole isocinétique classique. Souvent, les patients lombalgiques chroniques qui ont été rencontrés appréhendaient d'effectuer les exercices classiques. Les bilans isocinétiques obtenus à la suite de ces exercices en « mode classique » mettaient même en évidence que souvent, les patients n'atteignaient pas la vitesse imposée au dynamomètre isocinétique ($30^{\circ}.s^{-1}$), cela est probablement attribué aux comportements kinésiophobiques.

La littérature montre que ces comportements sont associés à de faibles vitesses de mouvement du tronc (Thomas & France 2007) mais pas forcément à un faible niveau de force maximal (Ishak et al. 2017). Par conséquent, lors d'exercices dynamiques maximaux, les vitesses limites risquent de ne pas être atteintes, sans que cela ne soit lié à un faible niveau de force, chez les patients kinésiophobiques. L'évaluation peut amener dans ces contextes à une sous-estimation de la force maximale.

L'utilisation du mode arthromoteur est associée à un déplacement systématique de la machine à la vitesse imposée. Cette modalité d'exercice pourrait être moins angoissante du point de vue des patients, puisque leurs mouvements ne sont plus à l'initiative du déplacement de la machine. Aussi, les résultats récoltés dans l'étude chez les sportifs (étude 2) lors de l'exercice « isocinétique classique » et lors de l'exercice maximal « arthromoteur » mettaient en évidence les mêmes différences entre les groupes, ce qui suggère que le mode arthromoteur

pourrait être un moyen alternatif pour évaluer les niveaux de force maximale des individus. Il reste néanmoins impossible de déterminer si ces exercices ont réellement été effectués au maximum des capacités des patients.

2. Les exercices sous-maximaux

La mise en place d'exercices sous-maximaux en mode arthromoteur avait notamment pour but d'évaluer les individus lors d'un exercice nécessitant le même travail musculaire absolu. Aujourd'hui, la plupart des études s'intéressant aux réponses physiologiques au cours d'un effort sous-maximal impose aux participants des intensités d'exercice relatives. Pour évaluer les réponses métaboliques et hémodynamiques au regard des muscles paravertébraux, Kankaanpää et collaborateurs (2005) avaient par exemple fixé l'intensité d'exercice en fonction du poids et de la taille des patients, tandis que Kell & Bhambhani (2003, 2006b) proposaient des exercices de port de charge maximaux, et analysaient ensuite l'évolution des variables en fonction du pourcentage du maximum. Aussi, le niveau de difficulté du test de Sorensen réside dans les propriétés anthropométriques individuelles (Kankaanpää et al. 1998a).

Il existe de réels avantages à proposer un exercice à intensité absolue. Cela permet notamment de quantifier un coût métabolique, indépendamment des capacités musculaires. Au vu de nos populations à évaluer, nous nous attendions à avoir des groupes de sujets hétérogènes concernant le niveau de force maximale. Ainsi, l'exercice à intensité relative donnait lieu à des différences dans le travail total musculaire fourni en fin d'exercice, impliquant différents niveaux de dépense énergétique. Proposer un exercice à une même intensité absolue nous a permis, d'une part, de nous affranchir de cela. D'autre part, il semblait intéressant de proposer un exercice à intensité absolue pour le suivi des lombalgies, afin de mettre en lumière les modifications des réponses métaboliques et hémodynamiques au regard des muscles paravertébraux entre les différentes périodes d'évaluation, pour la réalisation d'un exercice aux consignes strictement identiques. L'absence de différence significative entre les travaux totaux obtenus développé sur l'ergomètre, dans chaque étude, au cours de l'exercice à 80 N·m montre que la mise en place de ce protocole a bien répondu à notre but.

La seconde intention de ce protocole était de focaliser le travail sur les muscles du tronc. Or, l'analyse des signaux électromyographiques lors de l'étude 1 témoignent de l'implication des muscles gastrocnémiens et biceps fémoraux lors des exercices. L'utilisation d'un

dynamomètre isocinétique en mode arthromoteur, avec des phases passives de flexion du tronc, ne suffit pas à solliciter de manière spécifique les muscles paravertébraux. Ainsi, puisque l'entraînement peut engendrer des modifications du recrutement musculaire dans divers exercices (Glofcheskie & Brown 2017), dont les tâches d'extensions du tronc (Van Oosterwijk et al. 2017), l'implication musculaire des individus lors de ce protocole pourrait être influencée par le niveau d'activité physique.

Si les sollicitations musculaires sont différentes dans les groupes de participants, cela peut en partie expliquer les différences trouvées dans les réponses métaboliques à l'exercice dans différentes études. Par exemple, les judokas pourraient opter pour un pattern de recrutement musculaire différent de celui des sujets sportifs et des cyclistes au cours des exercices. Cela pourrait se traduire par une augmentation du niveau d'activation des muscles biceps fémoraux tout en diminuant celui des muscles paravertébraux. Ces différentes stratégies pourraient ainsi engendrer des besoins métaboliques différents au regard des muscles paravertébraux, comme suggéré par McKeon et collaborateurs (2006), et ainsi limiter la redistribution du flux sanguin vers ces muscles.

II) Réponses aérobies au cours des exercices sous-maximaux

Pour évaluer les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux, un analyseur des échanges gazeux pulmonaires et la technique de la spectroscopie proche infrarouge ont été utilisés de manière concomitante. A partir de ces outils, l'oxygénation (ΔHHb et ΔHbO_2) et le volume sanguin musculaire (ΔTHb) ont été calculées, ainsi que la cinétique d'adaptation de $\dot{V}\text{O}_2$ et l'efficacité mécanique.

1. L'ajustement de l'oxygénation et du volume sanguin des muscles paravertébraux à l'exercice

Au cours de chaque exercice et dans chacune des études, la spectroscopie proche infrarouge révélait des réponses à l'exercice qui peuvent être divisées en deux phases :

1.1 Phase I : Diminution du volume sanguin musculaire et augmentation de la désoxygénation

La première phase était caractérisée par la diminution de ΔTHb , reflet du volume sanguin musculaire (Ferrari et al. 2004). A cela, était associée une augmentation de ΔHHb chez

les individus sportifs (chez les participants de l'étude 1 et les athlètes de l'étude 2), tandis que chez les lombalgiques chroniques et chez leur contrôle, ΔHHb restait stable. L'augmentation de ΔHHb est le reflet de la désoxygénation musculaire, c'est-à-dire de l'extraction de l' O_2 résultant de la contribution aérobie à l'exercice, pour fournir l'énergie nécessaire à la contraction musculaire (Jones et al. 2009). La diminution de ΔTHb à l'exercice est moins habituelle puisque l'exercice physique est plutôt associé à une augmentation du volume sanguin local (Bhambhani 2004) résultant de la redistribution du flux sanguin vers les territoires actifs (Volianitis & Secher 2002). Au regard des muscles paravertébraux, c'est toutefois un tout autre phénomène qui a déjà été mis en évidence dans la littérature. En effet, en accord avec nos résultats, la contraction de ces muscles a déjà été associée à une diminution du ΔTHb (Yoshitake et al. 2001; Kell & Bhambhani 2003; Dupeyron et al. 2009). Cette diminution du volume sanguin musculaire est non seulement dépendante des populations évaluées, mais aussi des intensités d'exercice. Par exemple, les expérimentations menées dans l'étude 3 ont mis en évidence, chez les jeunes non-sportifs une diminution de ΔTHb uniquement de la première à la troisième minute d'exercice lors de l'exercice à 80 N·m, tandis que cette diminution était visible jusqu'à la dernière minute lors de l'exercice à 70%max.

L'hypothèse principale à propos de ce mécanisme serait l'existence d'une pression intramusculaire trop importante au niveau paravertébral à l'exercice, qui augmenterait avec l'intensité de l'exercice. Ce phénomène pourrait même limiter le flux sanguin local, comme il l'a été montré dans un modèle animal (Kobayashi et al. 2010). De tels mécanismes pourraient compromettre l'apport de l'hémoglobine oxygénée jusqu'au muscle, et altérer l'oxygénation musculaire. Cette altération de l'oxygénation musculaire est suggérée à travers l'absence d'augmentation de ΔHHb chez les lombalgiques chroniques et leur contrôle dans l'étude 3.

1.2 Phase II : Stabilisation ou augmentation du volume sanguin musculaire

Dans la seconde phase d'adaptation, on assiste à une stabilisation de ΔHHb et de ΔTHb , excepté pour le groupe de cyclistes chez qui ΔTHb augmentait. Aussi, après le programme de restauration fonctionnelle du rachis, il n'y avait plus de diminution de ΔTHb à l'exercice chez les patients lombalgiques. Ces résultats suggèrent que la pratique d'exercices physiques, et plus spécifiquement l'entraînement en aérobie, est associée à une amélioration des réponses hémodynamiques. Celles-ci permettent alors d'augmenter l'apport en sang jusqu'au muscle même lors d'un exercice sollicitant spécifiquement les muscles du tronc, qui sont pourtant peu sollicités dans la pratique du cyclisme. L'entraînement sur ergocycle a déjà été décrit comme

efficace pour améliorer l'apport en oxygène jusqu'aux muscles des membres inférieurs lorsqu'ils sont sollicités (Costes et al. 2001). Toutefois à notre connaissance, de telles adaptations permises par l'entraînement sportif n'avaient jamais été mises en évidence au regard des muscles paravertébraux. Ces réponses pourraient ainsi permettre de contrecarrer l'augmentation de la pression intramusculaire, et augmenter l'apport en O₂ aux muscles et ainsi favoriser la contribution aérobie.

D'autres éléments de la littérature peuvent être mis en relation avec nos résultats, pour mieux comprendre les enjeux de la restriction du flux sanguin au regard des muscles paravertébraux sur la contribution du métabolisme aérobie. En effet depuis quelques années, les études qui s'intéressent aux spécificités des réponses à l'exercice au cours d'une restriction du flux sanguin musculaire se multiplient.

2. Les effets sur l'efficacité mécanique

Chez les sujets sains, la restriction du flux sanguin au regard des muscles des membres inférieurs a déjà été associée à l'augmentation du coût énergétique pendant un exercice de pédalage (Ozaki et al. 2010; Conceição et al. 2018) ou de marche (Pfeiffer et al. 2019). Cette augmentation du coût mécanique pourrait en partie être associée à une modification du recrutement musculaire, puisque la restriction du flux sanguin au regard du membre supérieur a déjà été associée à une augmentation du niveau d'activité musculaire, par rapport à l'exécution du même exercice à intensité absolue, sans restriction du flux sanguin (Yasuda et al. 2008).

Ainsi, nous pouvons supposer que la restriction du volume sanguin au regard des muscles paravertébraux (montrée à travers la diminution de ΔTHb) est associée à la diminution du flux sanguin et à l'augmentation de l'activation des muscles extenseurs du tronc lors des exercices isocinétiques sous-maximaux. Cela pourrait influencer sur l'efficacité mécanique. Dans le cadre de nos travaux qui ont porté sur les lombalgies chroniques, l'augmentation de l'efficacité mécanique à la fin du programme de restauration fonctionnelle pourrait alors être associée à une diminution de l'activation neuromusculaire, permise par l'amélioration des réponses hémodynamiques à l'exercice (suggérée par l'absence de diminution de ΔTHb à la fin du programme).

3. Les effets sur la cinétique d'adaptation de $\dot{V}\text{O}_2$

Si les spécificités hémodynamiques au regard des muscles paravertébraux peuvent altérer l'efficacité mécanique d'exercice, elles pourraient aussi affecter la cinétique

d'adaptation de $\dot{V}O_2$. Comme présentée dans la revue de la littérature, l'apport en O_2 serait le facteur limitant la cinétique d'adaptation à l'exercice uniquement dans des contextes particuliers (Poole & Jones 2012). Au vu des différents résultats de cette thèse, nous pouvons émettre l'hypothèse que la cinétique de $\dot{V}O_2$ lors d'un exercice prolongé d'extension du tronc pourraient être limitées par l'apport en O_2 jusqu'aux muscles paravertébraux. Le faible volume sanguin musculaire, secondaire à la restriction du flux sanguin, pourrait engendrer un apport en O_2 insuffisant en début d'exercice, limitant la contribution aérobie.

Par conséquent, l'amélioration des réponses hémodynamiques pourraient permettre d'augmenter l'apport en O_2 en début d'exercice et accélérer les cinétiques de $\dot{V}O_2$. Cette hypothèse peut être encouragée par l'accélération des cinétiques de $\dot{V}O_2$ chez les lombalgiques après le programme de restauration fonctionnelle, qui était associée à une absence de diminution de ΔTHb à l'exercice. Chez les cyclistes, l'accélération de la cinétique par rapport aux non-sportifs pourrait également être associée à de meilleures adaptations hémodynamiques (suggérées à travers l'augmentation de ΔTHb au cours de l'exercice). Elle pourrait aussi être permise par une accélération des processus relatifs à l'utilisation de l' O_2 (phosphorylation oxydative). A cause de l'hétérogénéité interindividuelle dans les réponses de ΔHHb à l'exercice, nous n'avons pas pu modéliser les cinétiques de ΔHHb comme cela a pu être fait ailleurs (McKay et al. 2009; Murias et al. 2016). Néanmoins, nous avons observé chez les cyclistes des augmentations de ΔHHb dès la première minute de chaque exercice. Ces réponses corroborent notre dernière hypothèse.

III) La pratique d'activités physiques chez les lombalgiques chroniques

L'objectif était de déterminer les effets liés à la pratique d'activités physiques des lombalgiques chroniques sur les symptômes, et de vérifier si les bénéfices, notamment sur la fatigabilité des muscles paravertébraux et sur les sensations de douleur, étaient associés à une modification des réponses du métabolisme aérobie musculaire à l'exercice.

Une des hypothèses de départ de cette thèse était que le haut niveau de fatigabilité musculaire et les sensations de douleur qui caractérisent les lombalgiques étaient associés à une inadéquation des réponses aérobie à l'exercice. Cela pourrait alors augmenter la contribution anaérobie à l'exercice. Le réentraînement des lombalgiques chroniques par l'activité physique pourrait ainsi améliorer les réponses hémodynamiques et métaboliques à l'exercice, cela

favoriserait alors la contribution aérobie, et limiterait les sensations de douleur et la fatigabilité au regard des muscles paravertébraux.

1. Les sensations de douleur

Dans la littérature la restriction du flux sanguin a déjà été associée à la production de métabolites tels que le lactate et H^+ (Suga et al. 2012; Teixeira et al. 2018). Aussi, Pollak et collaborateur (2014) ont rapporté que la diminution du pH et l'augmentation des concentrations de lactate sanguin induisait des sensations de douleur.

Ainsi, si la pratique d'activités physiques est associée à une amélioration des réponses hémodynamiques à l'exercice, elle pourrait aussi limiter la restriction du flux sanguin musculaire. Elle pourrait ainsi diminuer les sensations de douleur à l'exercice grâce à la limitation de l'accumulation de métabolites, secondaire à l'augmentation de la contribution aérobie. Cet hypothétique lien entre pression intramusculaire et sensations de douleur est encouragé par le modèle animal de Kobayashi et collaborateurs (2010) : dans ce modèle, l'augmentation de la pression intramusculaire au regard des muscles paravertébraux de rats était associée d'une part à la diminution du volume sanguin, et d'autre part à l'augmentation de la substance P, neuropeptide de la douleur.

Dans ce contexte, les sensations de douleur qui caractérisent les lombalgiques chroniques pourraient être secondaires aux limitations hémodynamiques, altérant la contribution aérobie à cause de l'apport en O_2 inadéquat, et augmentant alors la contribution anaérobie et la production de métabolites. La diminution des sensations de douleur pourrait alors être permise par une diminution de la contribution anaérobie à l'exercice, au profit de celle aérobie. Cette hypothèse est encouragée par la diminution des sensations de douleur après le programme de restauration fonctionnelle des lombalgiques d'une part, et d'autre part par l'accélération de la cinétique d'adaptation de $\dot{V}O_2$.

Néanmoins, trois mois après le programme de restauration fonctionnelle, les sensations de douleur étaient inchangées tandis que le volume sanguin musculaire à l'exercice s'effondrait. Aussi, les résultats de l'étude comparative lombalgiques chroniques vs sujets sains (étude 3) ne témoignent pas, au stade actuel de l'analyse des données, de spécificités dans les réponses hémodynamiques au regard des muscles paravertébraux des lombalgiques chroniques qui pourrait confirmer une restriction du flux sanguin spécifique à cette population. Alors, la diminution des sensations de douleur après la prise en charge des patients pourrait résulter d'une

meilleure tolérance à la douleur (Jones et al. 2014) plutôt que d'une modification des réponses physiologiques.

2. Impact sur la force, la fatigabilité et les capacités aérobies musculaires

Tandis que les résultats de l'étude 2 supportent que la sollicitation spécifique des muscles du tronc soit nécessaire pour augmenter la force maximale des muscles extenseurs du tronc au cours d'une exercice dynamique, le programme de restauration fonctionnelle n'était pas associé à une augmentation la force maximale des lombalgiques. Cela va à l'encontre de notre hypothèse de départ puisque le programme était notamment constitué de séances d'exercices physiques sollicitant spécifiquement les muscles du tronc. La durée du programme peut être insuffisante pour permettre l'amélioration de la force. Toutefois, l'analyse préliminaire des résultats de l'étude 3 montre que le niveau de force maximale des lombalgiques est inférieur par rapport aux sujets contrôles 3. Il semble alors nécessaire d'augmenter le niveau de force maximale des patients pour obtenir des valeurs proches de celles de sujets sains, d'autant que ce faible niveau de force peut être prédictif de futures douleurs lombaires (Takala & Viikari-Juntura 2000). C'est pourquoi, les patients doivent être encouragés à poursuivre la pratique d'activités physiques, et plus précisément la pratique d'exercices sollicitant les muscles du tronc après le programme de restauration fonctionnelle pour renforcer les muscles du tronc (Chang et al. 2015).

Néanmoins, les travaux de cette thèse ont largement mis en évidence l'impact positif d'un programme de restauration fonctionnelle chez les lombalgiques sur d'autres variables. La fatigabilité des muscles paravertébraux était notamment améliorée. Une modification de la typologie musculaire pourrait expliquer cela, toutefois la littérature montre qu'une période de restauration fonctionnelle de 4 semaines ne permet pas de telles modifications (Käser et al. 2001). D'autres mécanismes peuvent aussi expliquer la diminution de la fatigabilité musculaire: celle-ci peut être attribuée à la meilleure contribution du métabolisme aérobie, permettant ainsi la production d'énergie mécanique avec une moindre accumulation de métabolites produits par la filière anaérobie (Cipryan et al. 2017).

L'amélioration des réponses aérobies des patients lombalgiques chroniques apparaissent à travers plusieurs évolutions : la mise en parallèle des résultats sur le suivi des lombalgiques et sur les sportifs (étude 2 et 4) suggère que chez les lombalgiques, l'efficacité mécanique a été augmentée grâce au renforcement musculaire, tandis que l'accélération de la cinétique de $\dot{V}O_2$ et l'augmentation du volume sanguin et de la désoxygénation des muscles

paravertébraux à l'exercice semble plutôt être attribuées à la prise en charge aérobie (Neary et al. 2002; McKay et al. 2009; Uchiyama et al. 2011). En effet, les deux modalités de pratique sont associées à des réponses aérobies spécifiques au cours de l'exercice d'extension du tronc. Ainsi, la combinaison des deux modalités d'exercice semble être un moyen pertinent pour améliorer les réponses aérobies musculaires. Grâce à la modification de ces réponses, la fatigabilité des muscles paravertébraux sera limitée grâce à une augmentation de la contribution aérobie, au détriment des contributions anaérobies lactiques.

Au vu du non maintien de certains des bénéfices trois mois après le programme et du faible niveau d'activité physique après le retour à domicile, les patients lombalgiques chroniques doivent être encouragés à pratiquer davantage d'exercices dans leur quotidien. Cela pourrait permettre la préservation, voire l'augmentation des capacités physiques (Olivier et al. 2007) et/ou psychologiques. Néanmoins, les bienfaits liés à la pratique d'activités en autonomie sont parfois contrastés (Hurwitz et al. 2005). Lorsqu'elles ne sont pas encadrées, ces pratiques peuvent être inadaptées, irrégulières et seulement temporaires. Les patients doivent être encouragés à se rapprocher de structures d'Activités Physiques Adaptées, où ils pourront être pris en charge par des professionnels du Sport-Santé (Saubade et al. 2016).

CONCLUSION

Les travaux de cette thèse montrent très largement les effets positifs de l'entraînement sportif et du réentraînement à l'effort des lombalgiques chroniques sur les réponses métaboliques et hémodynamiques, au regard des muscles paravertébraux, à l'exercice. Puisque les adaptations des réponses sont différentes en fonction de l'activité pratiquée, les entraînements en aérobie et les entraînements en résistance des muscles du tronc représentent deux modalités d'entraînement qui méritent d'être considérées, pour améliorer la contribution aérobie lorsque les muscles paravertébraux sont sollicités : c'est-à-dire en quasi-permanence. Grâce à la combinaison des deux entraînements, le rachis pourrait être préservé de microlésions, les contre-performances sportives limitées, et les risques de blessures amoindries. Chez les lombalgiques chroniques, cela pourrait participer à extraire les patients du cercle du déconditionnement, grâce à l'amélioration des réponses aérobies, mais également grâce aux autres bénéfices physiques et psychologiques permis par la pratique d'activités physiques

PERSPECTIVES

La mise en parallèle des résultats de ces travaux avec ceux d'autres études nous suggère qu'il pourrait y avoir une étroite relation entre l'augmentation de la pression intramusculaire à l'exercice, la restriction du flux sanguin, l'altération des réponses aérobies et les sensations de douleur dans les muscles paravertébraux. Aujourd'hui, la manipulation de la pression intramusculaire au regard des muscles paravertébraux est complexe et/ou très invasive. C'est pourquoi des auteurs ont mis en place un modèle animal (Kobayashi et al. 2010) mais il reste difficile d'admettre qu'un modèle animal puisse réellement refléter la situation des lombalgiques chroniques, et encore moins que les muscles paravertébraux de rongeurs fonctionnent de la même manière que les nôtres. Ainsi, la recherche sur les relations entre ces mécanismes susceptibles d'apparaître ensemble au regard des muscles paravertébraux, méritent d'être poursuivie chez l'homme.

Aujourd'hui, différents outils de mesure se développent et pourraient nous permettre d'étudier quels effets aurait l'augmentation de la pression intramusculaire sur les réponses à l'exercice concernant l'apport et l'utilisation de l'O₂ (mesure d'oxygénation musculaire, de débit sanguin, détermination des cinétiques de phosphocréatine, des cinétiques de $\dot{V}O_2$), et aussi sur les douleurs. L'étude de ces différents mécanismes pourrait mettre en évidence un lien entre une augmentation disproportionnée de la pression intramusculaire au regard des muscles paravertébraux à l'exercice et une altération des réponses aérobies, engendrant des sensations de douleur et/ou une faible tolérance à l'exercice.

Pour augmenter la pression intramusculaire au regard des muscles paravertébraux, le meilleur moyen non invasif chez l'homme aujourd'hui semble être la contraction musculaire, d'autant que de simples changements de posture suffisent à augmenter cette pression (Dupeyron et al. 2009). De cette manière, le flux sanguin pourrait être rapidement compromis, altérant l'oxygénation musculaire (Kramer et al. 2005). Nous pourrions envisager de mettre en place des exercices d'extension du tronc en isométrie, avec charge, pour augmenter la pression intramusculaire au regard des muscles paravertébraux. Cette pression pourrait être mesurée par l'intermédiaire d'un cathéter (Dupeyron et al. 2009 ; Kramer et al. 2005). En parallèle, d'autres mesures pourraient être effectuées relatives à la contribution du métabolisme aérobie (par spectroscopie du phosphore 31 par résonance magnétique ; Liu et al. 2017 ; Kemp et al. 2015), et au flux sanguin musculaire (avec l'utilisation d'un laser doppler au regard des muscles

paravertébraux, comme l'ont utilisé Larsson et collaborateurs en 1990 pour évaluer le flux sanguin au regard du muscle trapèze). La technique du laser Doppler semble néanmoins très invasive et l'une des alternatives à cet outil est l'utilisation de la spectroscopie proche infrarouge, à travers l'évaluation de ΔTHb , comme nous l'avons effectué dans le cadre de ces travaux de thèse (von Aspern et al. 2016). Lors de cet exercice proposé pour augmenter la pression intramusculaire dans les muscles paravertébraux, les douleurs pourraient aussi être évaluées grâce à la mesure de la substance P (Molina-Ortega et al. 2014 ; Karlsson et al. 2015).

Si cette hypothétique relation entre augmentation de la pression intramusculaire, altération des réponses aérobies et douleurs dans le bas du dos venait à être confirmée, nous pourrions nous intéresser aux effets de la modulation de l'apport en O_2 en début d'exercice. En effet, dans le cas où la relation serait réelle, la limitation de l'apport en O_2 jusqu'aux muscles paravertébraux (causée par la restriction du flux sanguin) pourrait être le facteur limitant la contribution aérobie à l'exercice. Alors, l'augmentation de l'apport pourrait avoir un effet sur les réponses aérobies (cinétique de $\dot{V}\text{O}_2$, efficacité mécanique), les sensations de douleur et la tolérance à l'exercice, en diminuant les effets néfastes engendrés par la haute pression intramusculaire. Par exemple, nous pourrions évaluer les effets d'une injection d'adénosine à l'exercice, qui a une action vasodilatatrice (Grassi et al. 2000). Cela pourrait améliorer l'apport en O_2 jusqu'aux muscles paravertébraux, et ainsi augmenter la contribution du métabolisme aérobie à l'exercice. En conséquence, la tolérance à l'effort et/ou les sensations de douleur associées à l'exercice pourraient être améliorées.

Concernant les patients lombalgiques, il est toujours difficile de comprendre quels sont les mécanismes sous-jacents à la pathologie. Néanmoins, nos résultats ont mis en évidence des comportements musculaires (niveaux d'activation et manifestations de fatigue) surprenants chez des sujets sains, lors de nos exercices sous-maximaux. Par conséquent, il serait pertinent de proposer le même protocole à des patients lombalgiques chroniques, afin de déterminer si on retrouve ou non, les mêmes réponses électromyographiques que chez les sujets sains. Au contraire des sujets évalués dans l'étude 1, les patients lombalgiques pourraient présenter des manifestations de fatigue neuromusculaire au regard des muscles paravertébraux à l'exercice, et/ou une faible implication des muscles abdominaux et/ou des muscles co-agonistes. Ce type de résultats mettrait en évidence l'intérêt de ne pas focaliser uniquement le travail musculaire

des lombalgiques sur les muscles du dos, mais plutôt d'effectuer des séances de renforcement global des muscles du tronc (muscles abdominaux et paravertébraux) et des muscles des membres inférieurs (muscles grands glutéaux, ischiojambiers, gastrocnémiens) (Nourbakhsh & Arab 2002). Cela pourrait aussi permettre de mieux comprendre les facteurs associés à la fatigue musculaire du lombalgique et aux douleurs : la fatigue des muscles paravertébraux à l'exercice pourrait être attribuée à une trop faible activation des muscles co-agonistes, les sensations de douleur pourraient être attribuées à une trop faible activation des muscles abdominaux.

Dans le cadre de la prise en charge des patients, il serait intéressant de déterminer quels effets aurait l'adhésion sur le long terme des patients à une pratique d'activités physiques adaptées et encadrées, plutôt qu'à des pratiques individuelles, non-structurées, à domicile ou dans les salles de sports traditionnelles. Ce type de pratique pourrait permettre, grâce à la prise en charge des malades par des professionnels de la santé, d'éviter le décrochage des patients à la pratique et d'éviter les effets délétères que peut avoir une activité inadaptée. De cette manière, la prise en charge des patients serait prolongée et les bénéfices ne pourraient qu'en être amplifiés. Pourtant, aucun des patients rencontrés trois mois après le programme n'avait adhéré à ce type de pratique. Mettre en place un accompagnement post-programme des individus vers ce type de pratique qui combinerait des activités aérobies et du renforcement musculaire pourraient permettre d'augmenter les bénéfices permis par le programme de restauration fonctionnelle sur le long terme. L'étude de ce type d'accompagnement post-programme pourrait permettre de mettre en évidence les avantages des activités physiques adaptées pour la santé pour les lombalgiques chroniques en améliorant les capacités physiques, psychologiques et fonctionnelles des individus, et en favorisant la reprises des activités physiques, professionnelles et quotidiennes.

RÉFÉRENCES

- A -

Abergel E, Chatellier G, Hagege AA, Oblak A, Linhart A, Ducardonnet A, Menard J (2004) Serial left ventricular adaptations in world-class professional cyclists. *J Am Coll Cardiol* 44:144–149. doi: 10.1016/j.jacc.2004.02.057

Abt JP, Smoliga JM, Brick MJ, Jolly JT, Lephart SM, Fu FH (2007) Relationship between cycling mechanics and core stability. *J Strength Cond Res* 21:1300. doi: 10.1519/R-21846.1

Adegoke BOA, Babatunde FO (2007) Effect of an exercise protocol on the endurance of trunk extensor muscles—A randomized control trial. *Hong Kong Physiother J* 25:2–9. doi: 10.1016/S1013-7025(08)70002-2

Agence nationale d'accréditation et d'évaluation en santé (France) (2000) Diagnostic, prise en charge et suivi des malades atteints de lombalgie chronique, Service des recommandations et références professionnelles. Paris

Aguilaniu B, Péronnet F (2012) Le parcours de l'oxygène au cours de l'exercice incrémental. *Rev Mal Resp* 29:1224–1237. doi: 10.1016/j.rmr.2012.05.018

Albert WJ, Sleivert GG, Neary JP, Bhambhani YN (2004) Monitoring individual erector spinae fatigue responses using electromyography and near infrared spectroscopy. *Can J Appl Physiol* 29:363–378. doi: 10.1139/h04-023

Allison GT, Henry SM (2001) Trunk muscle fatigue during a back extension task in standing. *Man Ther* 6:221–228. doi: 10.1054/math.2001.0412

Anand K, Craig K (1996) New perspectives on the definition of pain. *Pain* 67:3–6. doi:

10.1016/0304-3959(96)03135-1

Andersson E, Swärd L, Thorstensson A (1988) Trunk muscle strength in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 20:587–593. doi: 10.1249/00005768-198812000-00012

Asmussen E, Bonde-Petersen F (1974) Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol Scand* 91:385–392. doi: 10.1111/j.1748-1716.1974.tb05693.x

Assurance Maladie (2017) Mal de dos : le bon traitement, c'est le mouvement ! <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/lombalgie-aigue/traitement-prevention>

Åstrand P-O, Rodahl K, Lacour JR, Duizabo D (1994) Précis de physiologie de l'exercice musculaire. Masson, Paris

- B -

Baecke JA, Burema J, Frijters JE (1982) A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. *Am J Clin Nutr* 36:936–942. doi: 10.1093/ajcn/36.5.936

Bangsbo J, Krstrup P, González-Alonso J, Boushel R, Saltin B (2000) Muscle oxygen kinetics at onset of intense dynamic exercise in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 279:R899-906. doi: 10.1152/ajpregu.2000.279.3.R899

Barbado D, Lopez-Valenciano A, Juan-Recio C, Montero-Carretero C, van Dieën JH, Vera-Garcia FJ (2016) Trunk Stability, Trunk Strength and Sport Performance Level in Judo. *PLoS ONE* 11:e0156267. doi: 10.1371/journal.pone.0156267

Barstow TJ, Lamarra N, Whipp BJ (1990) Modulation of muscle and pulmonary O₂ uptakes by circulatory dynamics during exercise. *J Appl Physiol* (1985) 68:979–989. doi: 10.1152/jappl.1990.68.3.979

- Battié MC, Bigos SJ, Fisher LD, Hansson TH, Nachemson AL, Spengler DM, Wortley MD, Zeh J (1989) A prospective study of the role of cardiovascular risk factors and fitness in industrial back pain complaints. *Spine (Phila Pa 1976)* 14:141–147. doi: 10.1097/00007632-199101000-00001
- Beaudreuil J, Kone H, Lasbleiz S, Vicaut E, Richette P, Cohen-Solal M, Lioté F, de Vernejoul MC, Nizard R, Yelnik A, Bardin T, Orcel P (2010) Efficacy of a functional restoration program for chronic low back pain: Prospective 1-year study. *Joint Bone Spine* 77:435–439. doi: 10.1016/j.jbspin.2010.03.003
- Bendix AE, Bendix T, Hastrup C, Busch E (1998a) A prospective, randomized 5-year follow-up study of functional restoration in chronic low back pain patients. *Eur Spine J* 7:111–119. doi: 10.1007/s005860050040
- Bendix AF, Bendix T, Labriola M, Bækgaard P (1998b) Functional restoration for chronic low back pain. Two-year follow-up of two randomized clinical trials. *Spine (Phila Pa 1976)* 23:717–725. doi: 10.1097/00007632-199803150-00013
- Bendix AF, Bendix T, Ostfeld S, Bush E, Andersen (1995) Active treatment programs for patients with chronic low back pain: a prospective, randomized, observer-blinded study. *Eur Spine J* 4:148–152. doi: 10.1007/BF00298239
- Bendix T, Bendix A, Labriola M, Hastrup C, Ebbelhøj N (2000) Functional restoration versus outpatient physical training in chronic low back pain: a randomized comparative study. *Spine (Phila Pa 1976)* 25:2494–2500. doi: 10.1097/00007632-200010010-00012
- Beere PA, Russell SD, Morey MC, Kitzman DW, Higginbotham MB (1999) Aerobic exercise training can reverse age-related peripheral circulatory changes in healthy older men. *Circulation* 100:1085–1094. doi: 10.1161/01.CIR.100.10.1085
- Biering-Sørensen F (1984) Physical measurements as risk indicators for low-back trouble over a one-year period. *Spine (Phila Pa 1976)* 9:106–119
- Bigard AX, Duforez F, Portero P, Guezennec CY (1992) Détermination de l'activité physique par questionnaire: validation du questionnaire autoadministrable de Baecke. *Sci Sports* 7:215–221. doi: 10.1016/S0765-1597(05)80093-0
- Bogduk N (2005) *Clinical anatomy of the lumbar spine and sacrum*, 4. ed. Elsevier, Edinburgh
- Bolarinde SO, Adegoke BOA, Ayanniyi OO, Olagbegi MO (2017) Effectiveness of stretching on kinesiophobia and health-related quality of life in quarry workers with work-related low back pain. *Biomed Rev: J Basic and Appl Med Sci* 4:33–42.
- Bontoux L, Roquelaure Y, Billabert C, Dubus V, Sancho PO, Colin D, Bami L, Moisan S, Fanello S, Penneau-Fontbonne D, Richard I (2004) Étude du devenir à un an de lombalgiques chroniques inclus dans un programme associant reconditionnement à l'effort et action ergonomique. Recherche de facteurs prédictifs de retour et de maintien au travail. *Ann Readapt Med Phys* 47:563–572. doi: 10.1016/S0168-6054(04)00174-6
- Borg GA (1982) Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 14:377–381. doi: 10.1249/00005768-198205000-00012
- Bosco C, Montanari G, Ribacchi R, Giovenali P, Latteri F, Iachelli G, Faina M, Colli R, Dal Monte A, La Rosa M, Cortili G, Saibene F (1987) Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 56:138–143. doi: 10.1007/BF00640636

- C -

- Bouisset S, Zattara M (1981) A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neurosci Lett* 22:263–270. doi: 10.1016/0304-3940(81)90117-8
- Bousema EJ, Verbunt JA, Seelen HA, Vlaeyen JW, Knottnerus JA (2007) Disuse and physical deconditioning in the first year after the onset of back pain. *Pain* 130:279–286. doi: 10.1016/j.pain.2007.03.024
- Boushel R, Piantadosi CA (2000) Near-infrared spectroscopy for monitoring muscle oxygenation. *Acta Physiol Scand* 168:615–622. doi: 10.1046/j.1365-201x.2000.00713.x
- Brooks C, Kennedy S, Marshall PWM (2012) Specific trunk and general exercise elicit similar changes in anticipatory postural adjustments in patients with chronic low back pain: a randomized controlled trial. *Spine (Phila Pa 1976)* 37:E1543–E1550. doi: 10.1097/BRS.0b013e31826feac0
- Broskey NT, Boss A, Fares E-J, Greggio C, Gremion G, Schlüter L, Hans D, Kreis R, Boesch C, Amati F (2015) Exercise efficiency relates with mitochondrial content and function in older adults. *Physiol Rep* 3:e12418–e12418. doi: 10.14814/phy2.12418
- Brouwer E (1957) On simple formulae for calculating the heat expenditure and the quantities of carbohydrate and fat oxidized in metabolism of men and animals, from gaseous exchange (Oxygen intake and carbonic acid output) and urine-N. *Acta Physiol Pharmacol Neerl* 6:795–802
- Brox JI, Storheim K, Holm I, Friis A, Reikerås O (2005) Disability, pain, psychological factors and physical performance in healthy controls, patients with sub-acute and chronic low back pain: a case-control study. *J Rehabil Med* 37:95–99. doi: 10.1080/16501970410017738
- Caby I, Olivier N, Janik F, Vanvelcenaher J, Pelayo P (2016) A controlled and retrospective study of 144 chronic low back pain patients to evaluate the effectiveness of an intensive functional restoration program in France. *Healthcare (Basel)* 4:23. doi: 10.3390/healthcare4020023
- Callaghan JP, Gregory DE, Durkin JL (2010) Do NIRS measures relate to subjective low back discomfort during sedentary tasks? *Int J Ind Ergon* 40:165–170. doi: 10.1016/j.ergon.2009.01.006
- Callister R, Callister R, Staron R, Fleck SJ, Tesch P, Dudley GA (1991) Physiological Characteristics of Elite Judo Athletes. *Int J Sports Med* 12:196–203. doi: 10.1055/s-2007-1024667
- Caputo F, Denadai BS (2004) Effects of aerobic endurance training status and specificity on oxygen uptake kinetics during maximal exercise. *Eur J Appl Physiol* 93:87–95. doi: 10.1007/s00421-004-1169-3
- Carey EJ (1927) The Anatomy, Physiology, and Anomalies of the Spine. *Radiology* 9:219–234. doi: 10.1148/9.3.219
- Chan CW, Mok NW, Yeung EW (2011) Aerobic exercise training in addition to conventional physiotherapy for chronic low back pain: a randomized controlled trial. *Arch Phys Med Rehabil* 92:1681–1685. doi: 10.1016/j.apmr.2011.05.003
- Chang WD, Lin HY, Lai PT (2015) Core strength training for patients with chronic low back pain. *J Phys Ther Sci* 27:619–622. doi: 10.1589/jpts.27.619
- Chaory K, Fayad F, Rannou F, Lefèvre-Colau MM, Fermanian J, Revel M, Poiraudreau S (2004) Validation of the French version of the fear avoidance belief questionnaire. *Spine (Phila Pa 1976)* 29:908–913

- Chaudhari AMW, McKenzie CS, Pan X, Oñate JA (2014) Lumbopelvic Control and Days Missed Because of Injury in Professional Baseball Pitchers. *Am J Sports Med* 42:2734–2740. doi: 10.1177/0363546514545861
- Cholewicki J, Panjabi MM, Khachatryan A (1997) Stabilizing function of trunk flexor-extensor muscles around a neutral spine posture. *Spine (Phila Pa 1976)* 22:2207–2212. doi: 10.1097/00007632-199710010-00003
- Cipryan L, Tschakert G, Hofmann P (2017) Acute and post-exercise physiological responses to high-Intensity interval training in endurance and sprint athletes. *J Sports Sci Med* 16:219–229
- Clark BC, Manini TM, Mayer JM, Ploutz-Snyder LL, Graves JE (2002) Electromyographic activity of the lumbar and hip extensors during dynamic trunk extension exercise. *Arch Phys Med Rehabil* 83:1547–1552. doi: 10.1053/apmr.2002.34828
- Clark BC, Manini TM, Ploutz-Snyder LL (2003) Derecruitment of the lumbar musculature with fatiguing trunk extension exercise. *Spine (Phila Pa 1976)* 28:282–287. doi: 10.1097/01.BRS.0000042227.06526.A2
- Clark DR, Lambert MI, Hunter AM (2018) Contemporary perspectives of core stability training for dynamic athletic performance: a survey of athletes, coaches, sports science and sports medicine practitioners. *Sports Med Open*. doi: 10.1186/s40798-018-0150-3
- Conley KE, Jubrias SA, Cress ME, Esselman P (2013) Exercise efficiency is reduced by mitochondrial uncoupling in the elderly: Mitochondrial uncoupling impacts exercise efficiency. *Exp Physiol* 98:768–777. doi: 10.1113/expphysiol.2012.067314
- Coste J, Le Parc JM, Berge E, Delecoeuillerie G, Paolaggi JB (1993) French validation of a disability rating scale for the evaluation of low back pain (EIFEL questionnaire). *Rev Rhum Ed Fr* 60:335–341
- Costes F, Prieur F, Féasson L, Geysant A, Barthélémy JC, Denis C (2001) Influence of training on NIRS muscle oxygen saturation during submaximal exercise. *Med Sci Sports Exerc* 33:1484–1489. doi: 10.1097/00005768-200109000-00010
- Coyle EF, Sidossis LS, Horowitz JF, Beltz JD (1992) Cycling efficiency is related to the percentage of type I muscle fibers. *Med Sci Sports Exerc* 24:782–788. doi: 10.1249/00005768-199207000-00008
- Cresswell AG, Oddsson L, Thorstensson A (1994) The influence of sudden perturbations on trunk muscle activity and intra-abdominal pressure while standing. *Exp Brain Res* 98:336–341. doi: 10.1007/BF00228421
- Cresswell AG, Thorstensson A (1994) Changes in intra-abdominal pressure, trunk muscle activation and force during isokinetic lifting and lowering. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 68:315–321. doi: 10.1007/BF00571450
- Conceição MS, Gáspari AF, Ramkrapes APB, Junior EMM, Bertuzzi R, Cavaglieri CR, Chacon-Mikahil MPT (2018) Anaerobic metabolism induces greater total energy expenditure during exercise with blood flow restriction. *PLOS ONE* 13:e0194776. doi: 10.1371/journal.pone.0194776

- D -

Demoulin C, Crielaard JM, Vanderthommen M (2007) Spinal muscle evaluation in healthy individuals and low-back-pain patients: a literature review. *Joint Bone Spine* 74:9–13. doi: 10.1016/j.jbspin.2006.02.013

- Demoulin C, Vanderthommen M, Duysens C, Crielaard JM (2006) Spinal muscle evaluation using the Sorensen test: a critical appraisal of the literature. *Joint Bone Spine* 73:43–50. doi: 10.1016/j.jbspin.2004.08.002
- Dersh J, Mayer TG, Gatchel RJ, Polatin PB, Theodore BR, Mayer EA. (2008) Prescription opioid dependence is associated with poorer outcomes in disabling spinal disorders: *Spine (Phila Pa 1976)* 33:2219–2227. doi: 10.1097/BRS.0b013e31818096d1
- Doury-Panchout F, Metivier JC, Borie-Malavieille MJ, Fouquet B (2012) VO₂max in patients with chronic pain: Comparative analysis with objective and subjective tests of disability. *Ann Phys Rehabil Med* 55:294–311. doi: 10.1016/j.rehab.2012.04.001
- Doury-Panchout F, Métivier JC, Fouquet B (2014) VO₂max in patients with chronic pain: The effect of a 4-week rehabilitation program. *Ann Phys Rehabil Med* 57:1–10. doi: 10.1016/j.rehab.2013.11.003
- Dunn KM, Croft PR (2006) The importance of symptom duration in determining prognosis. *Pain* 121:126–132. doi: 10.1016/j.pain.2005.12.012
- Dupeyron A, Lecocq J, Vautravers P, Péliissier J, Perrey S (2009) Muscle oxygenation and intramuscular pressure related to posture and load in back muscles. *Spine J* 9:754–759. doi: 10.1016/j.spinee.2009.04.005
- Duque I, Parra J, Duvallet A (2009) Physical deconditioning in chronic low back pain. *J Rehabil Med* 41:262–266. doi: 10.2340/16501977-0324
- Duque I, Parra J-H, Duvallet A (2011) Maximal aerobic power in patients with chronic low back pain: a comparison with healthy subjects. *Eur Spine J* 20:87–93. doi: 10.1007/s00586-010-1561-0
- Duray M, Yagci N, Ok N (2018) Determination of physical parameters associated with self-efficacy in patients with chronic mechanic low back pain. *J Back Musculoskelet Rehabil* 31:743–748. doi: 10.3233/BMR-170993
- Durkin JL, Harvey A, Hughson RL, Callaghan JP (2006) The effects of lumbar massage on muscle fatigue, muscle oxygenation, low back discomfort, and driver performance during prolonged driving. *Ergonomics* 49:28–44. doi: 10.1080/00140130500356882
- E -**
- Engelen M, Porszasz J, Riley M, Wasserman K, Maehara K, Barstow TJ (1996) Effects of hypoxic hypoxia on O₂ uptake and heart rate kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol* (1985) 81:2500–2508. doi: 10.1152/jappl.1996.81.6.2500
- F -**
- Ferrari M, Mottola L, Quaresima V (2004) Principles, techniques, and limitations of near infrared spectroscopy. *Can J Appl Physiol* 29:463–487. doi: 10.1139/h04-031
- Ferrari M, Muthalib M, Quaresima V (2011) The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 369:4577–4590. doi: 10.1098/rsta.2011.0230
- Ferrero E, Guigui P (2018) Current trends in the management of degenerative lumbar spondylolisthesis. *EFORT Open Rev* 3:192–199. doi: 10.1302/2058-5241.3.170050
- Fordyce WE, Brockway JA, Bergman JA, Spengler D (1986) Acute back pain: a control-group comparison of behavioral vs traditional management methods. *J Behav Med* 9:127–140. doi: 10.1007/BF00848473

- Fouquet B, Jacquot A, Nardoux J (2017) Rééducation de la lombalgie commune. *Revue du Rhumatisme Monographies* 84:29–38. doi: 10.1016/j.monrhu.2016.11.006
- Franchini E, Artioli GG, Brito CJ (2013) Judo combat: time-motion analysis and physiology. *Int J Perform Anal Sport* 13:624–641. doi: 10.1080/24748668.2013.11868676
- Franchini E, Del Vecchio FB, Matsushigue KA, Artioli GG (2011) Physiological profiles of elite judo athletes. *Sports Med* 41:147–166. doi: 10.2165/11538580-000000000-00000
- François RJ, Bywaters EG, Aufdermaur M (1985) Illustrated glossary for spinal anatomy. With explanations and a French and German translation. *Rheumatol Int* 5:241–245
- Frost H, Lamb ES, Moffett KAJ, Fairbank JC, Moser JS. (1998) A fitness programme for patients with chronic low back pain: 2-year follow-up of a randomised controlled trial. *Pain* 75:273–279. doi: 10.1016/S0304-3959(98)00005-0
- G -**
- Gaesser GA, Brooks GA (1975) Muscular efficiency during steady-rate exercise: effects of speed and work rate. *J Appl Physiol* (1985) 38:1132–1139. doi: 10.1152/jappl.1975.38.6.1132
- Gaesser GA, Brooks GA (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med Sci Sports Exerc* 16:29–43. doi: 10.1249/00005768-198401000-00008
- Gilchrist RV, Frey ME, Nadler SF (2003) Muscular control of the lumbar spine. *Pain Physician* 6:361–368
- Girard O, Billaut F, Christian RJ, Bradley PS, Bishop DJ (2017) Exercise-related sensations contribute to decrease power during repeated cycle sprints with limited influence on neural drive. *European Journal of Applied Physiology* 117:2171–2179. doi: 10.1007/s00421-017-3705-y
- Gleim GW, Stachenfeld NS, Nicholas JA (1990) The influence of flexibility on the economy of walking and jogging. *J Orthop Res* 8:814–823. doi: 10.1002/jor.1100080606
- Glofcheskie GO, Brown SHM (2017) Athletic background is related to superior trunk proprioceptive ability, postural control, and neuromuscular responses to sudden perturbations. *Hum Mov Sci* 52:74–83. doi: 10.1016/j.humov.2017.01.009
- Godges JJ, MacRae H, Longdon C, Tinberg C, MacRae P (1989) The effects of two stretching procedures on hip range of motion and Gait economy. *J Orthop Sports Phys Ther* 10:350–357. doi: 10.2519/jospt.1989.10.9.350
- Goubert D, De Pauw R, Meeus M, Willems T, Cagnie B, Schoupe S, Van Oosterwijck J, Dhondt E, Danneels L (2017) Lumbar muscle structure and function in chronic versus recurrent low back pain: a cross-sectional study. *Spine J* 17:1285–1296. doi: 10.1016/j.spinee.2017.04.025
- Gourmelen J, Chastang JF, Ozguler A, Lanoë JL, Ravaud JF, Leclerc A (2007) Fréquence des lombalgies dans la population française de 30 à 64 ans. Résultats issus de deux enquêtes nationales. *Ann Readapt Med Phys* 50:633–639. doi: 10.1016/j.annrmp.2007.05.008
- Granata KP, Marras WS, Davis KG (1999) Variation in spinal load and trunk dynamics during repeated lifting exertions. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 14:367–375. doi: 10.1016/S0268-0033(99)00004-2
- Granata KP, Wilson SE (2001) Trunk posture and spinal stability. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 16:650–659. doi:

10.1016/S0268-0033(01)00064-X

Grassi B (2000) Skeletal muscle VO₂ on-kinetics: set by O₂ delivery or by O₂ utilization? New insights into an old issue. *Med Sci Sports Exerc* 32:108–116. doi: 10.1097/00005768-200001000-00017

Grassi B, Gladden LB, Samaja M, Stary CM, Hogan MC (1998) Faster adjustment of O₂ delivery does not affect V̇_{O₂} on-kinetics in isolated in situ canine muscle. *J Appl Physiol* (1985) 85:1394–1403. doi: 10.1152/jappl.1998.85.4.1394

Grassi B, Hogan MC, Kelley KM, Aschenbach WG, Hamann JJ, Evans RK, Patillo RE, Gladden LB (2000) Role of convective O₂ delivery in determining VO₂ on-kinetics in canine muscle contracting at peak VO₂. *J Appl Physiol* (1985) 89:1293–1301. doi: 10.1152/jappl.2000.89.4.1293

Grassi B, Poole DC, Richardson RS, Knight DR, Erickson BK, Wagner PD (1996) Muscle O₂ uptake kinetics in humans: implications for metabolic control. *J Appl Physiol* (1985) 80:988–998. doi: 10.1152/jappl.1996.80.3.988

Grassi B, Quaresima V (2016) Near-infrared spectroscopy and skeletal muscle oxidative function in vivo in health and disease: a review from an exercise physiology perspective. *J Biomed Opt* 21:091313. doi: 10.1117/1.JBO.21.9.091313

Green DJ, Spence A, Halliwill JR, Cable NT, Thijssen DH (2011) Exercise and vascular adaptation in asymptomatic humans: Exercise training and the vasculature. *Exp Physiol* 96:57–70. doi: 10.1113/expphysiol.2009.048694

Gremion G, Mahler F, Chantraine A (1996) Mesures isocinétiques de la force musculaire du rachis: influence de l'âge, de l'activité physique et des lombalgies. *Ann Readapt Med Phys* 39:43–49. doi:

10.1016/0168-6054(96)88050-0

Grey TM, Spencer MD, Belfry GR, Kowalchuk JM, Paterson DH, Murias JM (2015) Effects of age and long-term endurance training on V̇_{O₂} kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 47:289–298. doi: 10.1249/MSS.0000000000000398

Günay S, Yildirim Y, Karadibak D (2014) The effect of the muscle endurance training on the chronic low back pain. *Fizyoterapi Rehabilitasyon* 25:28–24. doi: 10.7603/s40680-014-0004-y

Gurd BJ, Peters SJ, Heigenhauser GJF, LeBlanc PJ, Doherty TJ, Paterson DH, Kowalchuk JM (2006) Prior heavy exercise elevates pyruvate dehydrogenase activity and speeds O₂ uptake kinetics during subsequent moderate-intensity exercise in healthy young adults: Pyruvate dehydrogenase activity and V̇_{O₂} kinetics in moderate exercise. *J Physiol* 577:985–996. doi: 10.1113/jphysiol.2006.112706

- H -

Handa N, Yamamoto H, Tani T, Kawakami T, Takemasa R (2000) The effect of trunk muscle exercises in patients over 40 years of age with chronic low back pain. *J Orthop Sci* 5:210–216. doi: 10.1007/s007760000050210.776

Hansen JW (1964) Postoperative management in lumbar disc protrusions: I Indications, method and results, II Follow-up on a trained and an untrained group of patients. *Acta Orthop Scand* 35:3–47. doi: 10.3109/ort.1964.35.suppl-71.01

Havet N, Rulliere JL, Nechba A, Amaz C, Volckmann P, Chaleat-Valayer E, Le Blay G (2016) Évaluation à long terme d'un programme de réentraînement à l'effort pour les lombalgies : existe-t-il des facteurs influençant la reprise des activités professionnelles et de loisirs ? *Douleurs* 17:13–21. doi: 10.1016/j.douleur.2015.12.006

- Hawker GA, Mian S, Kendzerska T, French M (2011) Measures of adult pain: Visual Analog Scale for Pain (VAS Pain), Numeric Rating Scale for Pain (NRS Pain), McGill Pain Questionnaire (MPQ), Short-Form McGill Pain Questionnaire (SF-MPQ), Chronic Pain Grade Scale (CPGS), Short Form-36 Bodily Pain Scale (SF -36 BPS), and Measure of Intermittent and Constant Osteoarthritis Pain (ICOAP). *Arthritis Care Res (Hoboken)* 63:S240–S252. doi: 10.1002/acr.20543
- Hellsten Y, Nyberg M (2015) Cardiovascular Adaptations to Exercise Training. In: Terjung R (ed) *Comprehensive Physiology*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp 1–32
- Henchoz Y, de Goumoëns P, Norberg M, Paillex R, So AK (2010) Role of physical exercise in low back pain rehabilitation: a randomized controlled trial of a three-month exercise program in patients who have completed multidisciplinary rehabilitation. *Spine (Phila Pa 1976)* 35:1192–1199. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181bf1de9
- Heneweer H, Vanhees L, Picavet SJH (2009) Physical activity and low back pain: A U-shaped relation? *Pain* 143:21–25. doi: 10.1016/j.pain.2008.12.033
- Hibbs AE, Thompson KG, French D, Wrigley A, Spears I (2008) Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports Med* 38:995–1008. doi: 10.2165/00007256-200838120-00004
- Hides JA, Stokes MJ, Saide M, Jull GA, Cooper DH (1994) Evidence of lumbar multifidus muscle wasting ipsilateral to symptoms in patients with acute/subacute low back pain. *Spine (Phila Pa 1956)* 19:165–172. doi: 10.1097/00007632-199401001-00009
- Hoch AZ, Young J, Press J (2006) Aerobic fitness in women with chronic discogenic nonradicular low back pain. *Am J Phy Med Rehab* 85:607–613. doi: 10.1097/01.phm.0000223357.46190.cb
- Hodselmans AP, Dijkstra PU, Geertzen JHB, van der Schans CP (2010) Nonspecific chronic low back pain patients are deconditioned and have an increased body fat percentage. *Int J Rehabil Res* 33:268–270. doi: 10.1097/MRR.0b013e328335213f
- Hoffman MD, Shepanski MA, Mackenzie SP, Clifford PS (2005) Experimentally induced pain perception is acutely reduced by aerobic exercise in people with chronic low back pain. *J Rehabil Res Dev* 42:183–190
- Howley ET, Bassett DR, Welch HG (1995) Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc* 27:1292–1301. doi: 10.1249/00005768-199509000-00009
- Hoy D, March L, Brooks P, Blyth F, Woolf A, Bain C, Williams G, Smith E, Vos T, Barendregt J, Murray C, Burstein R, Buchbinder R (2014) The global burden of low back pain: estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Ann Rheum Dis* 73:968–974. doi: 10.1136/annrheumdis-2013-204428
- Hug F, Bendahan D, Savin B, Cozzone P, Grélot L (2003) Caractéristiques physiques et physiologiques de cyclistes professionnels. *Sci Sports* 18:212–215. doi: 10.1016/S0765-1597(03)00157-6
- Hughson RL (1984) Alterations in the oxygen deficit-oxygen debt relationships with beta-adrenergic receptor blockade in man. *J Physiol (Lond)* 349:375–387. doi: 10.1113/jphysiol.1984.sp015161
- Hughson RL, Tschakovsky ME, Houston ME (2001) Regulation of oxygen consumption at the onset of exercise. *Exerc Sport Sci Rev* 29:129–133. doi: 10.1097/00003677-200107000-00009

- J -

Hughson RL, Xing HC, Borkhoff C, Butler GC (1991) Kinetics of ventilation and gas exchange during supine and upright cycle exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 63:300–307. doi: 10.1007/BF00233866

Hultman G, Nordin M, Saraste H, Ohlsèn H (1993) Body composition, endurance, strength, cross-sectional area, and density of MM Erector Spinae in men with and without low back pain. *J Spinal Disord* 6:114-123. doi: 10.1097/00002517-199304000-00004

Huonker M, Schmid A, Schmidt-Trucksäß A, Grathwohl D, Keul J (2003) Size and blood flow of central and peripheral arteries in highly trained able-bodied and disabled athletes. *J Appl Physiol* (1985) 95:685–691. doi: 10.1152/jappphysiol.00710.2001

Hurwitz EL, Morgenstern H, Chiao C (2005) Effects of recreational physical activity and back exercises on low back pain and psychological distress: findings from the UCLA low back pain study. *Am J Public Health* 95:1817–1824. doi: 10.2105/AJPH.2004.052993

Hwangbo G, Lee C-W, Kim SG, Kim HS (2015) The effects of trunk stability exercise and a combined exercise program on pain, flexibility, and static balance in chronic low back pain patients. *J Phys Ther Sci* 27:1153–1155. doi: 10.1589/jpts.27.1153

- I -

Imai A, Kaneoka K (2016) The relationship between trunk endurance plank tests and athletic performance tests in adolescent soccer players. *Int J Sports Phys Ther* 11:718–724

Ishak NA, Zahari Z, Justine M (2017) Kinesiophobia, pain, muscle functions, and functional performances among older persons with low back pain. *Pain Res Treat* 2017:1–10. doi: 10.1155/2017/3489617

Jackson CP, Brown MD (1983) Is there a role for exercise in the treatment of patients with low back pain? *Clin Orthop Relat Res* 39–45

Jensen BR, Jørgensen K, Hargens AR, Nielsen PK, Nicolaisen T (1999) Physiological response to submaximal isometric contractions of the paravertebral muscles. *Spine (Phila Pa 1976)* 24:2332–2338. doi: 10.1177/154193120004402895

Jones AM (2002) Running economy is negatively related to sit-and-reach test performance in international-standard distance runners. *Int J Sports Med* 23:40–43. doi: 10.1055/s-2002-19271

Jones AM, Carter H (2000) The Effect of Endurance Training on Parameters of Aerobic Fitness. *Sports Med* 29:373–386. doi: 10.2165/00007256-200029060-00001

Jones AM, Davies RC, Ferreira LF, Barstow TJ, Koga S, Poole DC (2009) Reply to Quaresima and Ferrari. *J Appl Physiol* 107:372–373. doi: 10.1152/jappphysiol.00314.2009

Jones AM, Poole DC (2005) $\dot{V}O_2$ onset kinetics in different disease states. In: *Oxygen uptake kinetics in sport, exercise and medicine*. Routledge, London

Jones MD, Booth J, Taylor JL, Barry BK (2014) Aerobic Training Increases Pain Tolerance in Healthy Individuals: *Med Sci Sports Exerc* 46:1640–1647. doi: 10.1249/MSS.0000000000000273

Jousset N, Fanello S, Bontoux L, Dubus V, Billabert C, Vielle B, Roquelaure Y, Penneau-Fontbonne D, Richard I (2004) Effects of functional restoration versus 3 hours per week physical therapy: a randomized controlled study. *Spine (Phila Pa 1976)* 29:487–493. doi: 10.1097/01.BRS.0000102320.35490.43

- K -

- Kalichman L, Carmeli E, Been E (2017) The Association between omaging parameters of the paraspinal muscles, spinal degeneration, and low back pain. *Biomed Res Int* 2017:1–14. doi: 10.1155/2017/2562957
- Kalliokoski KK, Oikonen V, Takala TO, Sipilä H, Knuuti J, Nuutila P (2001) Enhanced oxygen extraction and reduced flow heterogeneity in exercising muscle in endurance-trained men. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 280:E1015–E1021. doi: 10.1152/ajpendo.2001.280.6.E1015
- Kamper SJ, Apeldoorn AT, Chiarotto A, Smeets RJEM, Ostelo RWJG, Guzman J, van Tulder MW (2015) Multidisciplinary biopsychosocial rehabilitation for chronic low back pain Cochrane systematic review and meta-analysis. *BMJ* 350:h444–h444. doi: 10.1136/bmj.h444
- Kaneko M (1990) Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *J Biomech* 23 Suppl 1:57–63. doi: 10.1016/0021-9290(90)90041-Z
- Kankaanpää M, Colier WN, Taimela S, Anders C, Airaksinen O, Kokko-Aro SM, Hänninen O (2005) Back extensor muscle oxygenation and fatigability in healthy subjects and low back pain patients during dynamic back extension exertion. *Pathophysiology* 12:267–273. doi: 10.1016/j.pathophys.2005.09.013
- Kankaanpää M, Taimela S, Laaksonen D, Hänninen O, Airaksinen O (1998b) Back and hip extensor fatigability in chronic low back pain patients and controls. *Arch Phys Med Rehabil* 79:412–417. doi: 10.1016/S0003-9993(98)90142-3
- Karlsson L, Gerdle B, Ghafouri B, Bäckryd E, Olausson P, Ghafouri N, Larsson B (2015) Intramuscular pain modulatory substances before and after exercise in women with chronic neck pain: Muscle pain, peripheral substances and exercise. *European Journal of Pain* 19:1075–1085. doi: 10.1002/ejp.630
- Käser L, Mannion AF, Rhyner A, Weber E, Dvorak J, Müntener M (2001) Active therapy for chronic low back pain: part 2. Effects on paraspinal muscle cross-sectional area, fiber type size, and distribution. *Spine (Phila Pa 1976)* 26:909–919. doi: 10.1097/00007632-200104150-00014
- Kauppila LI, Mikkonen R, Mankinen P, Peltto-Vasenius K, Mäenpää I (2004) MR Aortography and Serum Cholesterol Levels in Patients With Long-Term Nonspecific Lower Back Pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 29:2147–2152. doi: 10.1097/01.brs.0000141168.77393.b8
- Kell RT, Bhambhani Y (2008) Relationship between erector spinae muscle oxygenation via in vivo near infrared spectroscopy and static endurance time in healthy males. *Eur J Appl Physiol* 102:243–250. doi: 10.1007/s00421-007-0577-6
- Kell RT, Bhambhani Y (2003) Cardiorespiratory and hemodynamic responses during repetitive incremental lifting and lowering in healthy males and females. *Eur J Appl Physiol* 90:1–9. doi: 10.1007/s00421-002-0776-0
- Kell RT, Bhambhani Y (2006a) Relationship between erector spinae static endurance and muscle oxygenation-blood volume changes in healthy and low back pain subjects. *Eur J Appl Physiol* 96:241–248
- Kell RT, Bhambhani Y (2006b) In vivo erector spinae muscle blood volume and oxygenation measures during repetitive incremental lifting and lowering in chronic low back pain participants. *Spine* 31:2630–2637. doi: 10.1097/01.brs.0000240647.57959.72
- Kell RT, Farag M, Bhambhani Y (2004)

- Reliability of erector spinae oxygenation and blood volume responses using near-infrared spectroscopy in healthy males. *Eur J Appl Physiol* 91:499–507. doi: 10.1007/s00421-003-1014-0
- Kelly DT, Tobin C, Egan B, McCarren A, O'Connor PL, McCaffrey N, Moyna NM (2018) Comparison of sprint interval and endurance training in team sport athletes. *J Strength Cond Res* 32:3051–3058. doi: 10.1519/JSC.0000000000002374
- Kemp GJ, Ahmad RE, Nicolay K, Prompers JJ (2015) Quantification of skeletal muscle mitochondrial function by ³¹P magnetic resonance spectroscopy techniques: a quantitative review. *Acta Physiol (Oxf)* 213:107–144. doi: 10.1111/apha.12307
- Kim S, Kim H, Chung J (2014) Effects of spinal stabilization exercise on the cross-sectional areas of the lumbar multifidus and psoas major muscles, pain intensity, and lumbar muscle strength of patients with degenerative disc disease. *J Phys Ther Sci* 26:579–582. doi: 10.1589/jpts.26.579
- Kime R, Im J, Moser D, Nioka S, Katsumura T, Chance B (2009) Noninvasive determination of exercise-induced vasodilation during bicycle exercise using near infrared spectroscopy. *Med Sci Monit* 15:CR89-94
- Knox MF, Chipchase LS, Schabrun SM, Marshall PWM (2017) Improved compensatory postural adjustments of the deep abdominals following exercise in people with chronic low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 37:117–124. doi: 10.1016/j.jelekin.2017.10.009
- Kobayashi Y, Sekiguchi M, Konno SI, Kikuchi SI (2010) Increased intramuscular pressure in lumbar paraspinal muscles and low back pain: model development and expression of substance P in the dorsal root ganglion. *Spine (Phila Pa 1976)* 35:1423–1428. doi: 10.1097/BRS.0b013e3181c645bb
- Kofotolis N, Kellis E (2006) 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* 86:1001–1012. doi: 10.1093/ptj/86.7.1001
- Koldaş Doğan Ş, Sonel Tur B, Kurtaiş Y, Atay MB (2008) Comparison of three different approaches in the treatment of chronic low back pain. *Clin Rheumatol* 27:873–881. doi: 10.1007/s10067-007-0815-7
- Konno S, Kikuchi S, Nagaosa Y (1994) The relationship between intramuscular pressure of the paraspinal muscles and low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 19:2186–2188. doi: 10.1097/00007632-199410000-00011
- Kort HD, Hendriks ER (1992) A comparison of selected isokinetic trunk strength parameters of elite male judo competitors and cyclists. *J Orthop Sports Phys Ther* 16:92–96. doi: 10.2519/jospt.1992.16.2.92
- Kovacs KM, Marras WS, Litsky AS, Gupta P, Ferguson SA (2001) Localized oxygen use of healthy and low back pain individuals during controlled trunk movements. *J Spinal Disord* 14:150–158. doi: 10.1097/00002517-200104000-00010
- Kramer M, Dehner C, Hartwig E, Völker HU, Sterk J, Elbel M, Weikert E, Gerngross H, Kinzl L, Willy C (2005) Intramuscular pressure, tissue oxygenation and EMG fatigue measured during isometric fatigue-inducing contraction of the multifidus muscle. *Eur Spine J* 14:578–585. doi: 10.1007/s00586-004-0857-3
- Krebs HA (1940) The citric acid cycle and the Szent-Györgyi cycle in pigeon breast muscle. *Biochem J.* 34(5):775-9.

- Kumar T, Kumar S, Nezamuddin M, Sharma VP (2015) Efficacy of core muscle strengthening exercise in chronic low back pain patients. *J Back Musculoskelet Rehabil* 28:699–707. doi: 10.3233/BMR-140572
- Kunimune Y, Harada Y, Kabuto Y, Takeuchi K, Senda M, Inoue H (1999) Recovery from exercise-induced desaturation in the paraspinal muscles in idiopathic scoliosis. *Spine (Phila Pa 1976)* 24:2019–2024
- L -
- Lacour JR, Bourdin M (2015) Factors affecting the energy cost of level running at submaximal speed. *Eur J Appl Physiol* 115:651–673. doi: 10.1007/s00421-015-3115-y
- Lam YY, Ravussin E (2016) Analysis of energy metabolism in humans: A review of methodologies. *Mol Metab* 5:1057–1071. doi: 10.1016/j.molmet.2016.09.005
- Larsson SE, Bodegård L, Henriksson KG, Oberg PA (1990) Chronic trapezius myalgia. Morphology and blood flow studied in 17 patients. *Acta Orthop Scand* 61:394–398. doi: 10.3109/17453679008993548
- Latey P (2002) Updating the principles of the Pilates method—Part 2. *J Bodyw Mov Ther* 6:94–101. doi: 10.1054/jbmt.2002.0289
- Laughlin MH, Cook JD, Tremble R, Ingram D, Colleran PN, Turk JR. (2006) Exercise training produces nonuniform increases in arteriolar density of rat soleus and gastrocnemius muscle. *Microcirculation* 13:175–186. doi: 10.1080/10739680600556829
- Lawlis GF, Cuencas R, Selby D, McCoy CE (1989) The development of the Dallas Pain Questionnaire. An assessment of the impact of spinal pain on behavior. *Spine (Phila Pa 1976)* 14:511–516. doi: 10.1097/00007632-198905000-00007
- Layec G, Bringard A, Le Fur Y, Micallef JP, Vilmen C, Perrey S, Cozzone PJ, Bendahan D (2016) Mitochondrial coupling and contractile efficiency in humans with high and low V̇O₂ peaks. *Med Sci Sports Exerc* 48:811–821. doi: 10.1249/MSS.0000000000000858
- Lee JH, Hoshino Y, Nakamura K, Kariya Y, Saita K, Ito K (1999) Trunk muscle weakness as a risk factor for low back pain: A 5-year prospective study. *Spine (Phila Pa 1976)* 24:54–57. doi: 10.1097/00007632-199901010-00013
- Lee JH, Ooi Y, Nakamura K (1995) Measurement of muscle strength of the trunk and the lower extremities in subjects with history of low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 20:1994–1996. doi: 10.1097/00007632-199509150-00006
- Lee PJ, Rogers EL, Granata KP (2006) Active trunk stiffness increases with co-contraction. *J Electromyogr Kinesiol* 16:51–57. doi: 10.1016/j.jelekin.2005.06.006
- Leinonen V, Kankaanpää M, Airaksinen O, Hänninen O (2000) Back and hip extensor activities during trunk flexion/extension: Effects of low back pain and rehabilitation. *Arch Phys Med Rehabil* 81:32–37. doi: 10.1016/S0003-9993(00)90218-1
- Lépine JP, Godchau M, Brun P, Lempérière T (1985) Evaluation of anxiety and depression among patients hospitalized on an internal medicine service. *Ann Med Psychol (Paris)* 143:175–189
- Liu Y, Gu Y, Yu X (2017) Assessing tissue metabolism by phosphorous-31 magnetic resonance spectroscopy and imaging: a methodology review. *Quant Imaging Med Surg* 7:707–716. doi: 10.21037/qims.2017.11.03
- Lund JP, Donga R, Widmer CG, Stohler CS

(1991) The pain-adaptation model: a discussion of the relationship between chronic musculoskeletal pain and motor activity. *Can J Physiol Pharmacol* 69:683–694. doi: 10.1139/y91-102

- M -

Macdonald M, Pedersen PK, Hughson RL (1997) Acceleration of VO₂ kinetics in heavy submaximal exercise by hyperoxia and prior high-intensity exercise. *J Appl Physiol* (1985) 83:1318–1325. doi: 10.1152/jappl.1997.83.4.1318

Maikala RV, Bhambhani YN (2006) In vivo lumbar erector spinae oxygenation and blood volume measurements in healthy men during seated whole-body vibration: Lumbar muscle physiological changes during whole-body vibration. *Exp Physiol* 91:853–866. doi: 10.1113/expphysiol.2006.033696

Maikala RV, Bhambhani YN (2009) Microvascularity of the lumbar erector spinae muscle during sustained prone trunk extension test. In: Liss P, Hansell P, Bruley DF, Harrison DK (eds) *Oxygen Transport to Tissue XXX*. Springer US, Boston, MA, pp 67–73

Malanga G, Wolff E (2008) Evidence-informed management of chronic low back pain with nonsteroidal anti-inflammatory drugs, muscle relaxants, and simple analgesics. *Spine J* 8:173–184. doi: 10.1016/j.spinee.2007.10.013

Mannion AF, Dumas GA, Cooper RG, Espinosa FJ, Faris MW, Stevenson JM (1997a) Muscle fibre size and type distribution in thoracic and lumbar regions of erector spinae in healthy subjects without low back pain: normal values and sex differences. *J Anat* 190 (Pt 4):505–513. doi: 10.1046/j.1469-7580.1997.19040505.x

Mannion AF, Käser L, Weber E, Rhyner A, Dvorak J, Müntener M (2000) Influence of age and duration of symptoms on fibre type distribution and size of the back muscles in chronic low back pain patients. *Eur Spine J* 9:273–281. doi: 10.1007/s005860000189

Mannion AF, Weber BR, Dvorak J, Grob D, Müntener M (1997b) Fibre type characteristics of the lumbar paraspinal muscles in normal healthy subjects and in patients with low back pain. *J Orthop Res* 15:881–887. doi: 10.1002/jor.1100150614

Maronitis AB, Kovacs KM, Splittstoesser RE, Marras WS (2000) The effectiveness of whole body and localized measures of fatigue. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 44:5-91-5-94

Marras WS, Davis KG, Ferguson SA, Lucas BR, Gupta P (2001) Spine loading characteristics of patients with low back pain compared with asymptomatic individuals. *Spine (Phila Pa 1976)* 26:2566–2574. doi: 10.1097/00007632-200112010-00009

Marty M, Blotman F, Avouac B, Rozenberg S, Valat JP (1998) Validation of the french version of the dallas pain questionnaire in chronic low back pain patients. *Rev Rhum Engl Ed* 65:126–134

Massé-Alarie H, Beaulieu LD, Preuss R, Schneider C (2015) Task-specificity of bilateral anticipatory activation of the deep abdominal muscles in healthy and chronic low back pain populations. *Gait Posture* 41:440–447. doi: 10.1016/j.gaitpost.2014.11.006

Masuda T, Miyamoto K, Oguri K, Matsuoka T, Shimizu K (2005) Relationship between the thickness and hemodynamics of the erector spinae muscles in various lumbar curvatures. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 20:247–253. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2004.10.008

- Mayer TG, Barnes D, Kishino ND, Nichols G, Gatchel RJ, Mayer H, Mooney V (1988) Progressive isoinertial lifting evaluation. I. A standardized protocol and normative database. *Spine (Phila Pa 1976)* 13:993–997. doi: 10.1097/00007632-198809000-00006
- Mayer TG, Gatchel RJ (1988) Functional restoration for spinal disorders: the sports medicine approach. Lea & Febiger, Philadelphia
- Mayer TG, Gatchel RJ, Mayer H, Kishino ND, Keeley J, Mooney V (1987) A prospective two-year study of functional restoration in industrial low back injury. An objective assessment procedure. *JAMA* 258:1763–1767. doi: 10.1001/jama.1987.03400130077037
- Mayer TG, Smith SS, Keeley J, Mooney V (1985) Quantification of lumbar function. *Spine (Phila Pa 1976)* 10:765–772. doi: 10.1097/00007632-198510000-00012
- McGill SM, Hughson RL, Parks K (2000) Lumbar erector spinae oxygenation during prolonged contractions: implications for prolonged work. *Ergonomics* 43:486–493. doi: 10.1080/001401300184369
- McKeon MD, Albert WJ, Neary JP (2006) Assessment of neuromuscular and haemodynamic activity in individuals with and without chronic low back pain. *Dyn Med* 5:6. doi: 10.1186/1476-5918-5-6
- Meinild Lundby AK, Jacobs RA, Gehrig S, de Leur J, Hauser M, Bonne TC, Flück D, Dandanell S, Kirk N, Kaeck A, Ziegler U, Larsen S, Lundby C (2018) Exercise training increases skeletal muscle mitochondrial volume density by enlargement of existing mitochondria and not de novo biogenesis. *Acta Physiol (Oxf)* 222(1). doi: 10.1111/apha.12905
- Merletti R, Rainoldi A, Farina D (2001) Surface electromyography for noninvasive characterization of muscle. *Exerc Sport Sci Rev* 29:20–25. doi: 10.1097/00003677-200101000-00005
- Meucci RD, Fassa AG, Faria NMX (2015) Prevalence of chronic low back pain: systematic review. *Rev Saude Publica* 49:1. doi: 10.1590/S0034-8910.2015049005874
- Meyer A (1917) Progress in theaching therapy. *JAMA* LXIX:861. doi: 10.1001/jama.1917.02590380003002
- Miyake M, Harada Y, Senda M, Oda K, Inoue H (2003) Oxygen dynamics at paraspinal muscles during exertion using near-infrared spectroscopy in patients with degenerative lumbar scoliosis. *J Orthop Sci* 8:187–191. doi: 10.1007/s007760300031
- Mogensen M, Bagger M, Pedersen PK, Fernström M, Sahlin K (2006) Cycling efficiency in humans is related to low UCP3 content and to type I fibres but not to mitochondrial efficiency: Cycling efficiency, training status and mitochondrial efficiency. *J Physiol* 571:669–681. doi: 10.1113/jphysiol.2005.101691
- Mok NW, Brauer SG, Hodges PW (2007) Failure to use movement in postural Strategies leads to increased spinal displacement in low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 32:E537–E543. doi: 10.1097/BRS.0b013e31814541a2
- Moore KL, Dalley AF, Agur AMR, Milaire J (2017) Anatomie médicale: aspects fondamentaux et applications cliniques, De Boeck Supérieur. Paris (France)
- Mori D, Sumiil H, Shiokawa M, Kunisada M, Harada T, Ono T (2016) Measurement of low back muscle fatigue and recovery time during and after isometric endurance test. In: Goonetilleke R, Karwowski W (eds) *Advances in Physical Ergonomics and Human Factors*. Springer International Publishing, Cham, pp 297–308
- Moseley L, Jeukendrup AE (2001) The

reliability of cycling efficiency. *Med Sci Sports Exerc* 33:621–627. doi: 10.1097/00005768-200104000-00017

Molina-Ortega F, Lomas-Vega R, Hita-Contreras F, Plaza Manzano G, Achalandabaso A, Ramos-Morcillo AJ, Martínez-Amat A (2014) Immediate effects of spinal manipulation on nitric oxide, substance P and pain perception. *Manual Therapy* 19:411–417. doi: 10.1016/j.math.2014.02.007

Mujika I, Padilla S (2001) Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med* 31:479–487. doi: 10.2165/00007256-200131070-00003

Murias JM, Kowalchuk JM, Paterson DH (2010) Speeding of $\dot{V}O_2$ kinetics with endurance training in old and young men is associated with improved matching of local O_2 delivery to muscle O_2 utilization. *J Appl Physiol* (1985) 108:913–922. doi: 10.1152/jappphysiol.01355.2009

Murias JM, Edwards JA, Paterson DH (2016) Effects of short-term training and detraining on VO_2 kinetics: Faster VO_2 kinetics response after one training session. *Scand J Med Sci Sports* 26:620–629. doi: 10.1111/sms.12487

Murtezani A, Hundozi H, Orovcanec N, Sllamniku S, Osmani T (2011) A comparison of high intensity aerobic exercise and passive modalities for the treatment of workers with chronic low back pain: a randomized, controlled trial. *Eur J Phys Rehabil Med* 47:359–366

- N -

Neary JP, McKenzie DC, Bhambhani YN (2002) Effects of short-term endurance training on muscle deoxygenation trends using NIRS. *Med Sci Sports Exerc*. 2002 Nov;34(11):1725-32.

Netter FH (2011) *Atlas of human anatomy*,

5th ed. Saunders/Elsevier, Philadelphia, PA

Ng JK, Kippers V, Richardson CA (1998) Muscle fibre orientation of abdominal muscles and suggested surface EMG electrode positions. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 38:51–58

Nguyen C, Poiraudau S, Revel M, Papelard A (2009) Lombalgie chronique : facteurs de passage à la chronicité. *Revue du Rhumatisme* 76:537–542. doi: 10.1016/j.rhum.2009.03.003

Nourbakhsh MR, Arab AM (2002) Relationship between mechanical factors and incidence of low back pain. *J Orthop Sports Phys Ther* 32:447–460. doi: 10.2519/jospt.2002.32.9.447

Okada T, Nakazato K, Iwai K, Tanabe M, Irie K, Nakajima H. (2007) Body mass, nonspecific low back pain, and anatomical changes in the lumbar spine in judo athletes. *J Orthop Sports Phys Ther* 37:688–693. doi: 10.2519/jospt.2007.2505

Oldervoll LM, Rø M, Zwart JA, Svebak S (2001) Comparison of two physical exercise programs for the early intervention of pain in the neck, shoulders and lower back in female hospital staff. *J Rehabil Med* 33:156–161

- O -

Olivier N, Thevenon A, Berthoin S, Prieur F (2013) An exercise therapy program can increase oxygenation and blood volume of the erector spinae muscle during exercise in chronic low back pain patients. *Arch Phys Med Rehabil* 94:536–542. doi: 10.1016/j.apmr.2012.10.028

Olivier N, Weissland T, Baeza J, Codron H, Trannoy V, Caby I (2007) Bénéfices à court terme d'un programme de réentraînement à l'effort pour lombalgiques chroniques. *Science & Motricité* 73–87. doi: 10.3917/sm.061.0073

Ozaki H, Brechue WF, Sakamaki M, Yasuda T, Nishikawa M, Aoki N, Ogita F, Abe T (2010) Metabolic and cardiovascular responses to upright cycle exercise with leg blood flow reduction. *J Sports Sci Med* 9:224–230.

- P -

Pääsuke M, Johanson E, Proosa M, et al (2002) Back extensor muscle fatigability in chronic low back pain patients and controls: Relationship between electromyogram power spectrum changes and body mass index. *J Back Musculoskelet Rehabil* 16:17–24

Panjabi MM (1992) The stabilizing system of the spine. Part I. Function, dysfunction, adaptation, and enhancement. *J Spinal Disord* 5:383–389; discussion 397. doi: 10.1097/00002517-199212000-00001

Penedo FJ, Dahn JR (2005) Exercise and well-being: a review of mental and physical health benefits associated with physical activity. *Curr Opin Psychiatry* 18:189–193. doi: 10.1097/00001504-200503000-00013

Perneger TV, Leplège A, Etter JF, Rougemont A (1995) Validation of a French-language version of the MOS 36-Item Short Form Health Survey (SF-36) in young healthy adults. *J Clin Epidemiol* 48:1051–1060. doi: 10.1016/0895-4356(94)00227-H

Phillips SM, Green HJ, MacDonald MJ, Hughson RL (1995) Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. *J Appl Physiol* 79:1914–1920. doi: 0.1152/jappl.1995.79.6.1914

Pfeiffer P, Cirilo-Sousa M, Santos H (2019) Effects of different percentages of Blood Flow restriction on energy expenditure. *Int J Sports Med* 40:186–190. doi: 10.1055/a-0828-8295

Poiraudeau S, Duvallet A, Dos Santos IB,

Revel M (1999) Efficacité à 1 an d'un programme de reconditionnement à l'effort proposé à des lombalgiques chroniques lourdement handicapés. *Ann Readapt Med Phys* 42:33–41. doi: 10.1016/S0168-6054(99)80033-6

Poiraudeau S, Lefevre Colau MM, Fayad F, Rannou F, Revel M (2004) Lombalgies. *EMC - Rhumatologie-Orthopédie* 1:295–319. doi: 10.1016/j.emcrho.2004.04.001

Poiraudeau S, Rannou F, Revel M (2007) de Intérêts du réentraînement à l'effort dans la lombalgie: le concept de restauration fonctionnelle. *Ann Readapt Med Phys* 50:419–424. doi: 10.1016/j.annrmp.2007.04.010

Pollak KA, Swenson JD, Vanhaisma TA, Hughen RW, Jo D, White AT, Light KC, Schweinhardt P, Amann M, Light AR (2014) Exogenously applied muscle metabolites synergistically evoke sensations of muscle fatigue and pain in human subjects: Synergistic metabolites evoke muscle pain and fatigue. *Exp Physiol* 99:368–380. doi: 10.1113/expphysiol.2013.075812

Pollock ML (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: cardiorespiratory aspects. *Ann N Y Acad Sci* 301:310–322. doi: 10.1111/j.1749-6632.1977.tb38209.x

Poole DC, Jones AM (2012) Oxygen uptake kinetics. *Compr Physiol* 2:933–996. doi: 10.1002/cphy.c100072

Poulain C, Kernéis S, Rozenberg S, Fautrel B, Bourgeois P, Foltz V (2010) Long-term return to work after a functional restoration program for chronic low-back pain patients: a prospective study. *Eur Spine J* 19:1153–1161. doi: 10.1007/s00586-010-1361-6

Power C, Frank J, Hertzman C, Schierhout G, Li L (2001) Predictors of low back pain onset in a prospective British study. *Am J Public Health* 91:1671–1678. doi:

10.2105/AJPH.91.10.1671

Prieske O, Muehlbauer T, Granacher U (2016) The role of trunk muscle strength for physical fitness and athletic performance in trained individuals: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med* 46:401–419. doi: 10.1007/s40279-015-0426-4

Psilander N, Frank P, Flockhart M, Sahlin K (2015) Adding strength to endurance training does not enhance aerobic capacity in cyclists: Concurrent training mitochondrial biogenesis. *Scand J Med Sci in Sports* 25:e353–e359. doi: 10.1111/sms.12338

- R -

Rainoldi A, Melchiorri G, Caruso I (2004) A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods* 134:37–43. doi: 10.1016/j.jneumeth.2003.10.014

Rasmussen-Barr E, Lundqvist L, Nilsson-Wikmar L, Ljungquist T (2008) Aerobic fitness in patients at work despite recurrent low back pain: A cross-sectional study with healthy age- and gender-matched controls. *J Rehab Med* 40:359–365. doi: 10.2340/16501977-0176

Ribaud A, Tavares I, Viollet E, Julia m, Hérisson C, Dupeyron A (2013) Which physical activities and sports can be recommended to chronic low back pain patients after rehabilitation? *Ann Phys Rehabil Med* 56:576–594. doi: 10.1016/j.rehab.2013.08.007

Rodineau J. (2005) Classification clinique des lésions récentes. In: *Muscle traumatique et mécanique*, Paris: Masson. pp 21–27

Roland M, Morris R (1983) A study of the natural history of back pain. Part I: development of a reliable and sensitive measure of disability in low-back pain. *Spine* 8:141–144. doi: 10.1007/978-1-4471-5451-8_59

Rossiter HB, Ward SA, Doyle VL, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ (1999) Inferences from pulmonary O₂ uptake with respect to intramuscular [phosphocreatine] kinetics during moderate exercise in humans. *J Physiol* 518 (Pt 3):921–932. doi: 10.1111/j.1469-7793.1999.0921p.x

Rowland TW, Auchinachie JA, Keenan TJ, Green GM (1987) Physiologic responses to treadmill running in adult and prepubertal males. *Int J Sports Med* 8:292–297. doi: 10.1055/s-2008-1025672

Ryan TE, Southern WM, Brizendine JT, McCully KK (2013a) Activity-induced changes in skeletal muscle metabolism measured with optical spectroscopy. *Med Sci Sports Exerc* 45:2346–2352. doi: 10.1249/MSS.0b013e31829a726a

Ryan TE, Southern WM, Reynolds MA, McCully KK (2013b) A cross-validation of near-infrared spectroscopy measurements of skeletal muscle oxidative capacity with phosphorus magnetic resonance spectroscopy. *J Appl Physiol* (1985) 115:1757–1766. doi: 10.1152/jappphysiol.00835.2013

- S -

Sakai Y, Matsuyama Y, Ishiguro N (2005) Intramuscular oxygenation of exercising trunk muscle in elderly persons. *J Lumbar Spine Disord* 11:145–156. doi: 10.3753/yotsu.11.148

Saubade M, Karatzioc C, Besson C, Gremion G, Benaim C, Norberg IM (2016) Activité physique et lombalgie chronique. *Swiss Sports & Exercise Medicine* 64(2):31-38

Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA (2004) Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34:465–485. doi: 10.2165/00007256-200434070-00005

Schiltenswolf M, Akbar M, Hug A, Pfüller

- U, Gantz S, Neubauer E, Flor H, Wang H (2014) Evidence of specific cognitive deficits in patients with chronic low back pain under long-term substitution treatment of opioids. *Pain Physician* 17:9–20
- Sculco AD, Paup DC, Fernhall B, Sculco MJ (2001) Effects of aerobic exercise on low back pain patients in treatment. *Spine J* 1:95–101. doi: 10.1016/S1529-9430(01)00026-2
- Searle A, Spink M, Ho A, Chuter V (2015) Exercise interventions for the treatment of chronic low back pain: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Clinical Rehabilitation* 29:1155–1167. doi: 10.1177/0269215515570379
- Shamsi M, Sarrafzadeh J, Jamshidi A, Arjmand N, Ghezelbash F (2017) Comparison of spinal stability following motor control and general exercises in nonspecific chronic low back pain patients. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 48:42–48. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2017.07.006
- Sharma A, Sargar K, Salter A (2017) Temporal evolution of disc in young patients with low back pain and stress reaction in lumbar vertebrae. *ANJR Am J Neuroradiol* 38:1647–1652. doi: 10.3174/ajnr.A5237
- Shiri R, Karppinen J, Leino-Arjas P, Solovieva S, Viikari-Juntura E (2010a) The association between obesity and low back pain: a meta-analysis. *Am J Epidemiol* 171:135–154. doi: 10.1093/aje/kwp356
- Shiri R, Karppinen J, Leino-Arjas P, Solovieva S, Viikari-Juntura E (2010b) The association between smoking and low back pain: a meta-analysis. *Am J Med* 123:87.e7–87.e35. doi: 10.1016/j.amjmed.2009.05.028
- Shnayderman I, Katz-Leurer M (2013) An aerobic walking programme versus muscle strengthening programme for chronic low back pain: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil* 27:207–214. doi: 10.1177/0269215512453353
- Shvartz E, Reibold RC (1990) Aerobic fitness norms for males and females aged 6 to 75 years: a review. *Aviat Space Environ Med* 61:3–11
- Silfies SP, Mehta R, Smith SS, Karduna AR (2009) Differences in feedforward trunk muscle activity in subgroups of patients with mechanical low back pain. *Arch Phys Med Rehabil* 90:1159–1169. doi: 10.1016/j.apmr.2008.10.033
- Silfies SP, Squillante D, Maurer P, Westcott S, Karduna AR (2005) Trunk muscle recruitment patterns in specific chronic low back pain populations. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 20:465–473. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.01.007
- Sinoway LI, Musch TI, Minotti JR, Zelis R (1986) Enhanced maximal metabolic vasodilatation in the dominant forearms of tennis players. *J Appl Physiol* (1985) 61:673–678. doi: 10.1152/jappl.1986.61.2.673
- Sipko T, Grygier D, Barczyk K, Elias G (2010) The occurrence of strain symptoms in the lumbosacral region and pelvis during pregnancy and after childbirth. *J Manipulative Physiol Ther* 33:370–377. doi: 10.1016/j.jmpt.2010.05.006
- Smeets RJ, van Geel KD, Verbunt JA (2009) Is the fear avoidance model associated with the reduced level of aerobic fitness in patients with chronic low back pain? *Arch Phys Med Rehabil* 90:109–117. doi: 10.1016/j.apmr.2008.07.009
- Smeets RJEM, Wade D, Hidding A, Van Leeuwen PJ, Vlaeyen JW, Knottnerus JA (2006a) The association of physical deconditioning and chronic low back pain: A hypothesis-oriented systematic review. *Disabil Rehabil* 28:673–693. doi: 10.1080/09638280500264782
- Smeets RJEM, Wittink H, Hidding A,

Knottnerus JA (2006b) Do patients with chronic low back pain have a lower level of aerobic fitness than healthy controls?: are pain, disability, fear of injury, working status, or level of leisure time activity associated with the difference in aerobic fitness level? *Spine (Phila Pa 1976)* 31:90–97; discussion 98

Strand LI, Ljunggren AE, Haldorsen EM, Espehaug B (2001) The impact of physical function and pain on work status at 1-year follow-up in patients with back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 26:800–808

Stratton JR, Levy WC, Cerqueira MD, Schwartz RS, Abrass IB (1994) Cardiovascular responses to exercise. Effects of aging and exercise training in healthy men. *Circulation* 89:1648–1655

Suga T, Okita K, Takada S, Omokawa M, Kadoguchi T, Yokota T, Hirabayashi K, Takahashi M, Morita N, Horiuchi M, Kinugawa S, Tsutsui H (2012) Effect of multiple set on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *Eur Journal Appl Physiol* 112:3915–3920. doi: 10.1007/s00421-012-2377-x

- T -

Takala EP, Viikari-Juntura E (2000) Do functional tests predict low back pain? *Spine (Phila Pa 1976)* 25:2126–2132. doi: 10.1097/00007632-200008150-00018

Tang JE, Hartman JW, Phillips SM (2006) Increased muscle oxidative potential following resistance training induced fibre hypertrophy in young men. *Appl Physiol Nutr Metab* 31:495–501. doi: 10.1139/h06-026

Tavafian SS, Jamshidi AR, Montazeri A (2008) A randomized study of back school in women with chronic low back pain: quality of life at three, six, and twelve months follow-up. *Spine (Phila Pa 1976)* 33:1617–1621. doi:

10.1097/BRS.0b013e31817bd31c

Teixeira EL, Barroso R, Silva-Batista C, Laurentino GC, Loenneke JP, Roschel H, Ugrinowitsch C, Tricoli V (2018) Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise. *Muscle Nerve* 57:107–111. doi: 10.1002/mus.25616

Thijssen DH, Dawson EA, van den Munckhof IC, Birk GK, Timothy Cable N, Green DJ (2013) Local and systemic effects of leg cycling training on arterial wall thickness in healthy humans. *Atherosclerosis* 229:282–286. doi: 10.1016/j.atherosclerosis.2013.05.013

Thomas EN, Pers YM, Mercier G, Cambiere JP, Frasson N, Ster F, Hérisson C, Blotman F (2010) The importance of fear, beliefs, catastrophizing and kinesiophobia in chronic low back pain rehabilitation. *Ann Phys Rehabil Med* 53:3–14. doi: 10.1016/j.rehab.2009.11.002

Thomas JS, France CR (2007) Pain-related fear is associated with avoidance of spinal motion during recovery from low back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 32:E460–E466. doi: 10.1097/BRS.0b013e3180bc1f7b

Thorell E, Kristiansson P (2012) Pregnancy related back pain, is it related to aerobic fitness? A longitudinal cohort study. *BMC Pregnancy Childbirth* 12:. doi: 10.1186/1471-2393-12-30

Timmons JA, Gustafsson T, Sundberg CJ, Jansson E, Greenhaff PL (1998) Muscle acetyl group availability is a major determinant of oxygen deficit in humans during submaximal exercise. *Am J Physiol* 274:E377-380. doi: 10.1152/ajpendo.1998.274.2.E377

Travell J, Rinzler S, Herman M (1942) Pain and disability of the shoulder and arm: Treatment by the intramuscular infiltration with procaine hydrochloride.

JAMA120:417. doi:
10.1001/jama.1942.02830410005002

Tsao H, Hodges PW (2008) Persistence of improvements in postural strategies following motor control training in people with recurrent low back pain. *J Electromyogr Kinesiol* 18:559–567. doi: 10.1016/j.jelekin.2006.10.012

Tschakovsky ME (2014) Is It or Isn't It Oxygen Delivery? The Debate Over What Limits Oxygen Uptake Kinetics Continues. *Exerc Sport Sci Rev* 42:2–3. doi: 10.1249/JES.0000000000000001

- U -

Uchiyama K, Miaki H, Terada S, Hosono M (2011) Effect of muscle strength training and muscle endurance training on muscle deoxygenation level and endurance performance. *J Phy Ther Sci* 23:349–355. doi: 10.1589/jpts.23.349

- V -

van Abbema R, Lakke SE, Reneman MF, van der Schans CP, van Haastert CJ, Geertzen JH, Wittink H (2011) Factors associated with functional capacity test results in patients with non-specific chronic low back pain: a systematic review. *J Occup Rehabil* 21:455–473. doi: 10.1007/s10926-011-9306-4

van der Velde G, Mierau D (2000) The effect of exercise on percentile rank aerobic capacity, pain, and self-rated disability in patients with chronic low-back pain: a retrospective chart review. *Arch Phys Med Rehabil* 81:1457–1463. doi: 10.1053/apmr.2000.9629

van Dieën JH, Luger T, van der Eb J (2012) Effects of fatigue on trunk stability in elite gymnasts. *Eur J Appl Physiol* 112:1307–1313. doi: 10.1007/s00421-011-2082-1

van Dieën JH, Selen LPJ, Cholewicki J (2003) Trunk muscle activation in low-back

pain patients, an analysis of the literature. *J Electromyogr Kinesiol* 13:333–351. doi: 10.1016/S1050-6411(03)00041-5.

van Dieën JH, Westebring-van der Putten EP, Kingma I, de Looze MP (2009) Low-level activity of the trunk extensor muscles causes electromyographic manifestations of fatigue in absence of decreased oxygenation. *J Electromyogr Kinesiol* 19:398–406. doi: 10.1016/j.jelekin.2007.11.010

van Oosterwijck J, De Ridder E, Vleeming A, Vanderstraeten G, Schoupe S, Danneels L (2017) Applying an active lumbopelvic control strategy during lumbar extension exercises: Effect on muscle recruitment patterns of the lumbopelvic region. *Hum Mov Sci* 54:24–33. doi: 10.1016/j.humov.2017.03.002

van Rooij WMJ, Senden R, Heyligers IC, Cuppen PM, van Hemert WL, Grimm B. (2015) Physical functioning of low back pain patients: perceived physical functioning and functional capacity, but not physical activity is affected. *Disabil Rehabil* 37:2257–2263. doi: 10.3109/09638288.2015.1019010

van Tulder M, Malmivaara A, Esmail R, Koes B (2000) Exercise therapy for low back pain: a systematic review within the framework of the cochrane collaboration back review group. *Spine (Phila Pa 1976)* 25:2784–2796

Verbunt JA, Seelen HA, Vlaeyen JW, van de Heijden GJ, Heuts PH, Pons K, Knottnerus JA (2003) Disuse and deconditioning in chronic low back pain: concepts and hypotheses on contributing mechanisms. *Eur J Pain* 7:9–21. doi: 10.1016/S1090-3801(02)00071-X

Verbunt JA, Smeets RJ, Wittink HM (2010) Cause or effect? Deconditioning and chronic low back pain. *Pain* 149:428–430. doi: 10.1016/j.pain.2010.01.020

- Verfaillie S, Delarue Y, Demangeon S, Beuret-Blanquart F (2005) Évaluation à quatre ans d'un programme de reconditionnement à l'effort pour lombalgie chronique. *Ann Readapt Med Phys* 48:53–60. doi: 10.1016/j.annrmp.2004.08.008
- Véron O, Tcherniatinsky E, Fayad F, Revel M, Poiraudéau S (2008) Lombalgie chronique et réentraînement à l'effort : application de la notion de niveau de douleur cliniquement acceptable. *Ann Readapt Med Phys* 51:642–649. doi: 10.1016/j.annrmp.2008.08.003
- Virgin WJ (1951) Experimental investigations into the physical properties of the intervertebral disc. *J Bone Joint Surg Br* 33-B:607–611. doi: 10.1302/0301-620X.33B4.607
- Vital JM, Boudissa M, Campana M (2015) Surgery for chronic low back pain: good option? Better than conservative treatment? *Bull Acad Natl Med* 199:1367–1382
- Volianitis S, Secher NH (2002) Arm blood flow and metabolism during arm and combined arm and leg exercise in humans. *J Physiol* 544:977–984. doi: 10.1113/jphysiol.2002.023556
- von Aspern K, Haunschild J, Hoyer A, Luehr M, Bakhtiary F, Misfeld M, Mohr FW, Etz CD (2016) Non-invasive spinal cord oxygenation monitoring: validating collateral network near-infrared spectroscopy for thoracoabdominal aortic aneurysm repair. *Eur J Cardiothorac Surg* 50:675–683. doi: 10.1093/ejcts/ezw063
- Vuillemin A (2011) Le point sur les recommandations de santé publique en matière d'activité physique. *Science & Sports*. doi: 10.1016/j.scispo.2011.06.007
- W -**
- Waddell G (1987) 1987 Volvo award in clinical sciences. A new clinical model for the treatment of low-back pain. *Spine (Phila Pa 1976)* 12:632–644. doi: 10.1097/00007632-198709000-00002
- Waddell G, Newton M, Henderson I, Somerville D, Main CJ (1993) A Fear-Avoidance Beliefs Questionnaire (FABQ) and the role of fear-avoidance beliefs in chronic low back pain and disability. *Pain* 52:157–168. doi: 10.1016/0304-3959(93)90127-B
- Walker BF (2000) The prevalence of low back pain: a systematic review of the literature from 1966 to 1998. *J Spinal Disord* 13:205–217
- Warburton DER, Bredin SSD (2017) Health benefits of physical activity: a systematic review of current systematic reviews. *Curr Opin Cardiol* 32:541–556. doi: 10.1097/HCO.0000000000000437
- Ware JE, Sherbourne CD (1992) The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Med Care* 30:473–483
- Watson P, Booker K, Main CJ, Chen ACN (1997) Surface electromyography in the identification of chronic low back pain patients: the development of the flexion relaxation ratio. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 12:165–171. doi: 10.1016/S0268-0033(97)00065-X
- Whipp BJ (1987) Dynamics of pulmonary gas exchange. *Circulation* 76:VI18-28
- Wilkerson DP, Berger NJA, Jones AM (2006) Influence of hyperoxia on pulmonary O₂ uptake kinetics following the onset of exercise in humans. *Respir Physiol Neurobiol* 153:92–106. doi: 10.1016/j.resp.2005.09.006
- Williams KR, Cavanagh PR (1987) Relationship between distance running mechanics, running economy, and performance. *J Appl Physiol* (1985) 63:1236–1245. doi: 10.1152/jappl.1987.63.3.1236

Wittink H, Hoskins Michel T, Wagner A, Sukiennik A, Rogers W (2000) Deconditioning in patients with chronic low back pain: fact or fiction? *Spine (Phila Pa 1976)* 25:2221–2228

Wormgoor MEA, Indahl A, van Tulder MW, Kemper HCG (2008) The impact of aerobic fitness on functioning in chronic back pain. *Eur Spine J* 17:475–483. doi: 10.1007/s00586-007-0547-z

- X -

Xu F, Rhodes EC (1999) Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med* 27:313–327. doi: 10.2165/00007256-199927050-00003

- Y -

Yahia A, Jribi S, Ghroubi S, Illeuch M, Baklouti S, Habib Elleuch M (2011) Evaluation of the posture and muscular strength of the trunk and inferior members of patients with chronic lumbar pain. *Joint Bone Spine* 78:291–297. doi: 10.1016/j.jbspin.2010.09.008

Yahia A, Yangui N, Mallek A, Ghroubi S, Elleuch MH (2017) Kinesiophobia, functional disability and physical deconditioning evaluation in chronic low back pain. *Ann Phys Rehabil Med* 60:e19–e20. doi: 10.1016/j.rehab.2017.07.144

Yang G, Chany A-M, Parakkat J, Burr D, Marras WS (2007) The effects of work experience, lift frequency and exposure duration on low back muscle oxygenation. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 22:21–27. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2006.07.005

Yasuda I, Minami Y, Daikuya S (2013) Trunk muscle strength in patient with low back pain. *Orthop Muscular Syst* 2:125. doi: 10.4172/2161-0533.1000125

Yasuda T, Brechue WF, Fujita T, Sato Y, Abe T (2008) Muscle activation during low-intensity muscle contractions with

varying levels of external limb compression. *J Sports Sci Med* 7:467–474.

Yoshitake Y, Ue H, Miyazaki M, Moritani T (2001) Assessment of lower-back muscle fatigue using electromyography, mechanomyography, and near-infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol* 84:174–179. doi: 10.1007/s004210170001

- Z -

Zigmond AS, Snaith RP (1983) The Hospital Anxiety and Depression Scale. *Acta Psychiatr Scand* 67:361–370. doi: 10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x

ANNEXES

(Annexe I) Paraspinal muscles deoxygenation and neuromuscular involvement of agonist and antagonist muscles during isokinetic trunk extension exercise. Agathe Anthierens, Frédéric Daussin, Khaoula El Ghali, André Thevenon, Patrick Mucci, Nicolas Olivier. Article soumis à *Spine*.

(Annexe II) Trunk Muscle Aerobic Metabolism Responses in Endurance Athletes, Combat Athletes and Untrained Men. Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. *International Journal of Sports Medicine* 2019; 40: 1–6. doi : 10.1055/a-0856-7207.

(Annexe III) Benefits of a four-week functional restoration program in chronic low back pain patients and three-month follow-up: focus on paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercise. Agathe Anthierens, Nicolas Olivier, André Thevenon, Patrick Mucci. Article soumis à *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*

Paraspinal muscles deoxygenation and neuromuscular involvement of agonist and antagonist muscles during isokinetic trunk extension exercise

Agathe Anthierens ¹
Frédéric Daussin (PhD) ¹
Khaoula El Ghali ¹
André Thevenon (PU) ^{1,2}
Patrick Mucci (PU) ¹
Nicolas Olivier (PhD) ¹

¹ Univ. Lille, Univ. Artois, Univ. Littoral Côte d'Opale, EA 7369 - URePSSS - Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société, F-59000 Lille, France

² CHRU Lille, Service de Médecine Physique et de Réadaptation fonctionnelle, Lille, France

Corresponding author: Agathe Anthierens
Univ. Lille, Univ. Artois, Univ. Littoral Côte d'Opale, EA 7369 - URePSSS - Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société, F-59000 Lille, France
Email : agatheanthierens@gmail.com
Tel : +33374008207
Address : Eurasport
413, Avenue Eugène Avinée
59120 LOOS – France
Conflicts of Interest and Source of Funding : None
Acknowledgment: None

Number of words / text : 2641
Number of words / abstract : 268
Number of words / mini abstract: 45

Abstract

Study design: Cross-sectional study

Objective: To investigate the motor unit recruitment of the agonist and antagonist muscles of trunk extension during isokinetic exercise, and to determine a potential relationship with paraspinal muscles metabolic and hemodynamic responses.

Summary of background data: Adequate paraspinal muscles endurance permit to prevent physical limitation, as they are continuously required for trunk stability and mobility. Trunk muscles function is often evaluated during trunk extension exercise on an isokinetic dynamometer, but paraspinal muscles are not the only ones required for trunk extension.

Methods: Sixteen young and healthy subjects performed a 5-minute exercise of trunk extension on an isokinetic dynamometer. At the end of the exercise, the pain intensity in the lower back and in the lower limb were estimated. During the exercise, the paraspinal muscles deoxygenation and blood volume were assessed using near infrared spectroscopy. Electromyography was used to assess the neuromuscular function of paraspinal muscles, biceps femoris, gastrocnemii and rectus abdominis, in analyzing the mean power frequency and the root mean square.

Results: The pain intensity was greater in lower back than in lower limb ($p < 0.05$). There were increases in paraspinal muscles deoxygenation and decreases in local blood volume ($p < 0.001$). EMG signals did not change in paraspinal muscles but in biceps femoris, gastrocnemii and rectus abdominis ($p < 0.05$).

Conclusion: Despite increase in local deoxygenation, there was no change in neuromuscular function in paraspinal muscles during prolonged exercise. On the contrary, the co-agonists and the antagonist presented neuromuscular fatigue manifestations. It suggests that these agonist and antagonist muscles are significantly involved in trunk extension, in order to prevent lower back fatigue and to preserve the spine.

Level of evidence: 3

Key words: paraspinal muscles, lower back, trunk, neuromuscular function, agonist, antagonist, endurance, electromyography, compensatory recruitment, muscle fatigue, near infrared spectroscopy, blood volume, deoxygenation, isokinetic

Key point:

- There was no neuromuscular fatigue manifestation in paraspinal muscles during 5-min isokinetic exercise of trunk extension.
- The EMG signals in biceps femoris, gastrocnemii and rectus abdominis changed during the 5-min exercise despite the passive flexion.
- There were positive correlations between the deoxygenation in paraspinal muscles and the normalized root mean square measured in paraspinal muscles, in biceps femoris and in gastrocnemii.
- In young and athletic population, the lower limb and the abdominal muscles seems to be solicited in order to prevent lower back fatigue and to preserve the spine.

Mini abstract/Précis

Young and athletic individuals performed a 5-minute isokinetic exercise of trunk extension. The level of deoxygenation in paraspinal muscles increased. However, neuromuscular fatigue manifestations were recorded only in biceps femoris, in gastrocnemii and in rectus abdominis whereas the paraspinal muscles and the spine seem preserved.

Introduction

Paraspinal muscles activation is required for the maintain of posture, stability of the trunk, and they are the first agonists for trunk extension. Then, these muscles are continuously required at low intensity, as during daily activities to accomplish repetitive and more intensive tasks involving the trunk, like lifting. In this context, sufficient paraspinal muscles endurance is a condition for good health, and to prevent physical limitations resulting from high level of paraspinal fatigability ¹.

Neuromuscular fatigue can be investigated, recording electrical activity of the skeletal muscle using surface electromyography. This informs about the implication of muscle motor units, as the mean power frequency (MPF) traduces the velocity of action potential conduction ^{2,3} and the normalized root-mean-square (RMS), reflects the motor units ⁴. One of the main factor determining the ability for muscles to perform prolonged contractions and preventing local fatigue resides in the aerobic metabolism responses, and notably in the adequacy between oxygen supply and muscle oxygen needs ⁵. In this context, EMG has ever been coupled with near infrared spectroscopy technique (NIRS) ⁶, which permits to assess the muscle oxygenation and local blood volume. In this context, some authors avec reported manifestations of neuromuscular fatigue to exercise, in paraspinal muscle, which was related to compromised local oxygenation even during low intensity contraction, but this is not consistently reported^{7,8}. Neuromuscular involvement and metabolic changes to exercise are largely influenced by the specificities of the task, even if still concerning trunk extension. Then, some of these specificities may involve more inadequate responses considered metabolic responses or neuromuscular function, but this is not yet established.

In order to assess trunk muscles function, isokinetic technique is largely used for lower back function evaluation and for helping in some medical diagnosis (Guilhem, 2014). However, trunk muscles are not the only ones implicated during trunk extension, especially during

prolonged exercise, as this can be accompanied by the activation of secondary agonists muscles, as biceps femoris to allow the continuation of exercise⁹⁻¹¹ and by the activation of abdominal muscles¹². Moreover, it has been suggested that recruitment of multiple muscles could prevent unbalanced in paraspinal muscle oxygenation¹³. However, the agonist and antagonist muscles activation during prolonged trunk extension exercise using an isokinetic dynamometer, and the potential relationship with paraspinal oxygenation, are still unknown.

In this study, we purposed to set a standardized prolonged exercise using a isokinetic dynamometer. We evaluated the aerobic metabolism responses and the pattern of contraction of the paraspinal muscles, biceps femoris, gastrocnemii and rectus abdominis in order to determine the part of each muscles during several minutes of trunk extension exercise.

We hypothesized that after 5 minutes of exercise, changes in EMG signals in paraspinal muscles would attest to the neuromuscular fatigue, and this would be associated to pain sensation, increase of local deoxygenation and in compensatory motor unit recruitment, related to increases in biceps femoris and gastrocnemii implication.

Materials and Methods

Subjects

Sixteen young and athletic individuals (3 women, 13 men) were recruited. All were aged between 18 and 22 years old (19.75 ± 0.21 years), the standing height was 1.77 ± 0.014 m, and the body mass index was 21.60 ± 0.40 kg.m⁻². The peak torque for trunk extension was 280.76 ± 2.96 N•m (table 1). They had no cardiac, neural or metabolic disorder and all were practicing at least 8 hours of physical activities each week. The participants gave a written informed consent. The experimental protocol was in accordance with the ethical standards of the institutional research committee, the Declaration of Helsinki and approved by a local ethical committee.

Isokinetic exercises

All volunteers performed a session of standardized exercises on an isokinetic dynamometer coupled with a specific trunk module moving in sagittal plane (Con-trex® TP-1000, CMV AG, Switzerland). Before performing isokinetic exercise, each subject was positioning on the dynamometer as mentioned in the manufacture's guidelines. They were in an upright position, the knees slightly flexed, attached by a pelvic belt and by pads at the level of the tibias, the thighs, and the chest. The anatomical zero and the amplitude of the movement were set. The range of motion was approximately extended from 65° flexion to 5° extension from neutral position.

The exercises were performed in continuous passive motion mode in order to standardize the speed of the exercises (60°•s⁻¹ during extension, 30°•s⁻¹ during flexion). After a warm up and a familiarization phase, individuals accomplished 3 maximal movements of trunk flexion and extension. Then, after a 5-minute rest period, they performed a 5-minute submaximal exercise of trunk extension, whereas the flexion was passive in order to focus the mechanical work on trunk extensor muscles. It was performed at an intensity of 80 N•m, corresponding to 32.49 ± 2.96 % of the peak torque (table 1). It was represented on a screen by a green band. A biofeedback diagram was displayed, showing each movement cycles in real time. At the end of the 5-minute exercise, the participants were asked to estimate the pain intensity in the lower back, then in the hamstrings, using a visual analogue scale (VAS) graduated from 0 (corresponding to "no pain at all") to 10 cm (corresponding to "worst pain imaginable").

Paraspinal muscles oxygenation measured by near infrared spectroscopy

Paraspinal muscles oxygenation was assessed using NIRS device, composed of a main computer and two probes (Portamon, Artinis Medical Systems®, The Netherlands). The probes have a light source emitting near infrared light at two different wavelengths (760 nm and 850 nm). The lights emitting are absorbed or scattered within tissue, and part of the scattered light

returns back through the skins to a detector. Oxygenated hemoglobin (Hb) and myoglobin (Mb) (HbO₂) absorbs light at 850 nm, against 730 nm for deoxygenated Hb-Mb (HHb). Thus, NIRS offers a potential tool to determine non-invasively the muscle oxygenation. The sum of the changes in HHb + HbO₂, i.e. total Hb-Mb (THb), gives an indication of changes in muscle blood volume under the interrogation zone.

Two NIRS probes were covered by clear plastic wrap, to prevent sweat accumulation on the emitters and the receptors so as to minimize signal distortion. They were placed on the right (R) and on the left (L), at 3 cm of the spine, in regard of paraspinal muscles and fixed by adhesive strapping and scratching belt. A differential pathlength factor of 4 was used. NIRS data were collected with a sampling frequency of 10 Hz. The data collected were averaged minute per minute and normalized by rest values to obtain ΔHHb , ΔHbO_2 and ΔTHb .

Surface electromyography

Before exercise, eight pairs of surface electrodes were placed on the participants. Two electrodes were placed on the right and the left side of the paraspinal region, above the NIRS probes. Two electrodes were placed on both biceps femoris, at one third of the line between the ischial tuberosity and the fibular head, two electrodes were placed on both gastrocnemii, at the midpoint between the Achille's tendon and the medial side of the popliteal cavity and two electrodes were placed on the rectus abdominis, on both side of the line joining the xyphoid process and the navel, at 3-cm from the midpoint.¹³⁻¹⁵

The reference electrode was positioned on the anterior superior iliac spine. Electromyographic signals were amplified (gain, 1000), filtered (bandwidth of frequency, 10 Hz to 1 kHz) and recorded (sampling frequency, 4 kHz) with an acquisition device (PowerLab 16/30 ML880; ADInstruments, Bella Vista, NSW, Australia) and its associated software (LabChart 7 ADInstruments, Bella Vista, NSW, Australia). The calculations were performed for each EMG bursts during all the test and the values were averaged minute per minute. Root

mean square (RMS) was calculated subsequently. Values were expressed as percent of maximal values measured during the maximal voluntary trunk flexion and extension. Mean power frequency (MPF) was determined from spectral analysis of the signal.

Statistical analyses

Data are presented as mean \pm S.E.M. All statistical analyses were performed using Sigmastat 3.5 software. The pain sensations were compared using a Student's t-test. All variables collected using near infrared spectroscopy and electromyography were analyzed minute per minute, during the 5-minute exercise. If the normality test succeeded, we performed a one-way repeated measures analyses of variance (ANOVA). If the normality test failed, we performed a one-way ANOVA on Ranks. The effect sizes were calculated using eta squared η^2 . Values are ranged from 0 to 1, 0.02 corresponding to small effect, 0.06 corresponding to medium effect and 0.14 corresponding to large effect.^{16,17}

The relationship between ΔHHb and RMS in paraspinal muscles, in biceps femoris and in gastrocnemii were analyzed from the minute per minute data for each individual, using a Spearman product moment correlation coefficient. Differences and correlations were considered significant if $p < 0.05$.

Results

Estimation of pain intensity (Table 1)

The pain intensity was higher in the lower back compared with the hamstrings ($p=0.029$).

Near infrared spectroscopy measurements (Figure 1)

On both side, there was a transient increase in ΔHbO_2 (R: $p=0.009$, $\eta^2=0.067$; L: $p < 0.001$, $\eta^2=0.148$), and an increase in ΔHHb (R: $p < 0.001$, $\eta^2=0.064$; L: $p < 0.001$, $\eta^2=0.034$). ΔTHb did not change on the right side, but it decreased on the left side ($p < 0.001$; $\eta^2=0.053$).

EMG measurements

Because of electrodes detachments or displacements, all EMG signals were not exploitable for analyze. Then, the population sample was from n=12 to n=16 in function of the electrode.

Mean power frequency (Figure 2). There were changes in MPF solely in the right gastrocnemius ($p=0.026$; $\eta^2=0.005$; $n=15$), and non-significant tendency to change in the left rectus abdominis ($p=0.080$; $\eta^2=0.016$; $n=12$).

Root-mean-square (Figure 3). RMS decreased in the left biceps femoris ($p=0.032$; $\eta^2=0.004$), in the right biceps femoris ($p=0.001$; $\eta^2=0.007$) and in the left gastrocnemius ($p=0.002$; $\eta^2=0.005$). Also, it increased in the right rectus abdominis ($p=0.023$; $\eta^2=0.008$).

Correlations between RMS and paraspinal muscles ΔHHb (Figure 4)

There were positive and significant correlations between paraspinal muscles ΔHHb and RMS signals measured in paraspinal muscles, biceps femoris and gastrocnemii ($p<0.001$).

Discussion

This study investigated the muscles activation during prolonged isokinetic trunk extension exercise. The increase in paraspinal muscles deoxygenation was not associated to changes in EMG signals. However, RMS in biceps femoris and in gastrocnemii decreased, whereas RMS in rectus abdominis increased.

Changes in paraspinal muscles oxygenation without changes in EMG signals

During the 5-minute exercise, ΔHbO_2 decreased and ΔHHb increased, showing a greater O_2 extraction by paraspinal muscles. This should be due to their implications during trunk extensions, confirmed by the high percent in paraspinal normalized RMS. It involved a local deoxygenation to permit muscle contraction along the exercise. In another hand, it involved a transient decrease in ΔTHb . This phenomenon has ever been mentioned in other works studying paraspinal muscles contraction (Yoshitake et al., 2001, Dupeyron et al, 2001, Jensen et al,1999),

and may result of capillary crushing related to an increase in intramuscular pressure which would involve a reduction in local blood volume¹⁸⁻²⁰.

Surprisingly, we found no change in EMG signals recorded in paraspinal muscles in association with oxygenation changes. This absence of decrease in MPF and RMS suggests the 5-minute exercise of trunk extension had no incidence on paraspinal neuromuscular fatigue in our population. This can be attributed to a high proportion of type I fibers, which have the most oxidative potential and which involve few metabolites production²¹. This steady state has ever been assessed during dynamic trunk contraction,²² whereas Clark et al (2002)⁹ found decreases in RMS trends. In this study, participants were asked to performed trunk extensions until exhaustion, without using isokinetic dynamometer. Also, the intensity of exercise and the population differed from a study to another, as the studied population. We included solely young men practicing regular physical activities, and the intensity of exercise was light. These elements may influence muscle recruitment patterns because of differences in biomechanical constraints and/or in physical fitness of individuals.

Despite constant RMS in paraspinal muscles, there was relationship between RMS and ΔHHb . The more the solicitation was, the more the local deoxygenation was. As, the association of changes in both EMG and NIRS¹⁸, and the lack of relationship between those measurements²³ have ever been established during isometric trunk contraction, it suggests that neuromuscular function in paraspinal muscles may be influenced by the intensity, the duration and the mode of contraction. It seems that this is more sensitive to isometric contraction, while oxygenation can be compromise during isokinetic trunk extension exercise without neuromuscular fatigue manifestations.

Biceps femoris and gastrocnemii implication

On the contrary of the paraspinal muscles, RMS and/or MPF decreased in biceps femoris and gastrocnemii. The decrease in MPF can be considered as the myoelectric

manifestation of local fatigue^{2,3} and the decreases in RMS show a reduction in active motor units which may also be due to local fatigue.²⁴ Then, they would be more affected than paraspinal muscles to this prolonged trunk extension exercise, inducing changes in motor unit recruitment. Moreover, their implications were related to the local deoxygenation in paraspinal muscles. Despite this pattern of muscle recruitment, the pain sensation was greater in lower back than in lower limb. The pain sensation would not be link to the neuromuscular fatigue. Then this could be related to the changes in ΔHHb and ΔHbO_2 , as hypoxia is a factor with sensitizing action on muscle nociceptors, in increasing the activity of group III and IV afferent fibers.²⁵ Another factor which could explain the pain sensation is the muscle hypoperfusion, resulting from blood volume restriction^{26,27}. Then, we can wonder if the changes in ΔHHb , ΔHbO_2 , and/or ΔTHb can be related to the level of pain sensation. Obviously, further investigations are needed to understand the potential relationship between those elements.

We expected that the changes in biceps femoris and gastrocnemii EMG signals would appear later than changes in paraspinal muscles. Finally, it seems that the pattern of contraction in our population limits the implication of paraspinal muscles, in order to prevent paraspinal muscles fatigue. This may be a way to protect the spine.

The rectus abdominis implication

Rectus abdominis presented also variations in EMG signals during the 5-minute exercise. We did not anticipate those trends, as the rectus abdominis is an agonist for trunk flexion, which was passive during our exercise. However, the increase in abdominal activation during lifting has ever been underlined.²⁸ First, this would permit the stabilization of the spine. Then, this would permit an increase in intra-abdominal pressure, which would unload the compressive charge on the spine.²⁹ As the activation of the biceps femoris and the gastrocnemii, the recruitment of this antagonist would be a way to preserve the spine.

Perspectives

Our effect sizes concerning changes in EMG signals were small, but we may wonder if a greater intensity of exercise would be related to larger effect sizes. Our population was young and athletic, then the relative intensity of exercise was low, and it was stopped after 5 minutes. With an increase in workload or duration, muscles recruitment might involve greater neuromuscular fatigue in abdominals and in lower limb, which could necessitate, upstream, a larger implication of the paraspinal muscles, compromising the spine. Also, greater intensity of exercise would induce greater O₂ needs (Astrand et al, 1994) and intramuscular pressure (Jensen et al, 1999). This could induce local fatigue resulting of an inadequate local blood volume, hence an imbalance between O₂ supply and O₂ needs. Then we may wonder if the increase in duration or workload intensity would induce differences in neuromuscular paraspinal function, and what would be the consequences on pain intensity in lower back.

Conclusion

To our knowledge, this is the first study to investigated the neuromuscular function of the agonist and antagonist muscles, and simultaneously paraspinal muscles oxygenation during isokinetic trunk extension exercise. Whereas we expected that paraspinal muscles would be the most fatigable, we recorded no fatigue manifestations, despite increases in local deoxygenation. Paraspinal muscles fatigability may have been prevented by the implication of the lower limb and of the abdominals, which may also protect the spine.

1. Granacher U, Gollhofer A, Hortobágyi T, et al. The importance of trunk muscle strength for balance, functional performance, and fall prevention in seniors: a systematic review. *Sports Med Auckl NZ* 2013;43:627–41.
2. Brody LR, Pollock MT, Roy SH, et al. pH-induced effects on median frequency and conduction velocity of the myoelectric signal. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 1991;71:1878–85.
3. Merletti R, Rainoldi A, Farina D. Surface electromyography for noninvasive characterization of muscle. *Exerc Sport Sci Rev* 2001;29:20–5.
4. Fuglsang-Frederiksen A, Johnsen B, de Carvalho M, et al. Variation in diagnostic strategy of the EMG examination--a multicentre study. *Clin Neurophysiol Off J Int Fed Clin Neurophysiol* 1999;110:1814–24.
5. Sahlin K, Tonkonogi M, Söderlund K. Energy supply and muscle fatigue in humans. *Acta Physiol Scand* 1998;162:261–6.
6. Kankaanpää M, Colier WN, Taimela S, et al. Back extensor muscle oxygenation and fatigability in healthy subjects and low back pain patients during dynamic back extension exertion. *Pathophysiology* 2005;12:267–73.
7. McGill SM, Hughson RL, Parks K. Lumbar erector spinae oxygenation during prolonged contractions: implications for prolonged work. *Ergonomics* 2000;43:486–93.
8. Van Dieën JH, Westebring-van der Putten EP, Kingma I, et al. Low-level activity of the trunk extensor muscles causes electromyographic manifestations of fatigue in absence of decreased oxygenation. *J Electromyogr Kinesiol Off J Int Soc Electrophysiol Kinesiol* 2009;19:398–406.
9. Clark BC, Manini TM, Mayer JM, et al. Electromyographic activity of the lumbar and hip extensors during dynamic trunk extension exercise. *Arch Phys Med Rehabil* 2002;83:1547–52.
10. Akebi T, Saeki S, Hieda H, et al. Factors affecting the variability of the torque curves at isokinetic trunk strength testing. *Arch Phys Med Rehabil* 1998;79:33–5.
11. Morini S, Ciccarelli A, Cerulli C, et al. Functional anatomy of trunk flexion-extension in isokinetic exercise: muscle activity in standing and seated positions. *J Sports Med Phys Fitness* 2008;48:17–23.
12. Allison GT, Henry SM. Trunk muscle fatigue during a back extension task in standing. *Man Ther* 2001;6:221–8.
13. McKeon MD, Albert WJ, Neary JP. Assessment of neuromuscular and haemodynamic activity in individuals with and without chronic low back pain. *Dyn Med*;5.
14. Rainoldi A, Melchiorri G, Caruso I. A method for positioning electrodes during surface EMG recordings in lower limb muscles. *J Neurosci Methods* 2004;134:37–43.
15. Ng JK, Kippers V, Richardson CA. Muscle fibre orientation of abdominal muscles and suggested surface EMG electrode positions. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1998;38:51–8.
16. Olejnik S, Algina J. Generalized Eta and Omega Squared Statistics: Measures of Effect Size for Some Common Research Designs. *Psychol Methods* 2003;8:434–47.
17. Bakeman R. Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behav Res Methods* 2005;37:379–84.
18. Yoshitake, H. Ue, , M. Miyazaki, et al. Assessment of lower-back muscle fatigue using electromyography, mechanomyography, and near-infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol* 2001;84:174–9.

19. Dupeyron A, Lecocq J, Vautravers P, et al. Muscle oxygenation and intramuscular pressure related to posture and load in back muscles. *Spine J Off J North Am Spine Soc* 2009;9:754–9.
20. Jensen BR, Sjøgaard G, Bornmyr S, et al. Intramuscular laser-Doppler flowmetry in the supraspinatus muscle during isometric contractions. *Eur J Appl Physiol* 1995;71:373–8.
21. Mannion AF, Dumas GA, Cooper RG, et al. Muscle fibre size and type distribution in thoracic and lumbar regions of erector spinae in healthy subjects without low back pain: normal values and sex differences. *J Anat* 1997;190 (Pt 4):505–13.
22. Morlock MM, Bonin V, Müller G, et al. Trunk muscle fatigue and associated EMG changes during a dynamic iso-inertial test. *Eur J Appl Physiol* 1997;76:75–80.
23. Albert WJ, Sleivert GG, Neary JP, et al. Monitoring individual erector spinae fatigue responses using electromyography and near infrared spectroscopy. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl* 2004;29:363–78.
24. Bigland-Ritchie B. EMG and fatigue of human voluntary and stimulated contractions. *Ciba Found Symp* 1981;82:130–56.
25. Kieschke J, Mense S, Prabhakar NR. Chapter 12 Influence of adrenaline and hypoxia on rat muscle receptors in vitro. In: *Progress in Brain Research*. Elsevier:91–7.
26. Larsson SE, Bodegård L, Henriksson KG, et al. Chronic trapezius myalgia. Morphology and blood flow studied in 17 patients. *Acta Orthop Scand* 1990;61:394–8.
27. Graven-Nielsen T, Arendt-Nielsen L. Peripheral and central sensitization in musculoskeletal pain disorders: an experimental approach. *Curr Rheumatol Rep* 2002;4:313–21.
28. Cresswell AG, Oddsson L, Thorstensson A. The influence of sudden perturbations on trunk muscle activity and intra-abdominal pressure while standing. *Exp Brain Res* 1994;98:336–41.
29. Bartelink DL. The role of abdominal pressure in relieving the pressure on the lumbar intervertebral discs. *J Bone Joint Surg Br* 1957;39–B:718–25.

Table 1 Individual and exercise characteristics (M: men; W: women; BMI: body mass index; Intensity: Relative workload intensity during the exercise in percent of the peak torque; PI: pain intensity).

Sexe (M/W)	Age (years)	Height (m)	BMI (kg.m ⁻²)	Peak torque (N•m)	Intensity (%)	Lower back PI (cm)	Lower limb PI (cm)
13/3	19.75 ± 0.21	1.77 ± 0.014	21.60 ± 0.40	280.76 ± 24.96	32.49 ± 2.96	0.70 ± 0.93*	0.20 ± 0.72

Values are mean ± S.E.M. Significant difference compared with lower limb PI * p<0.05

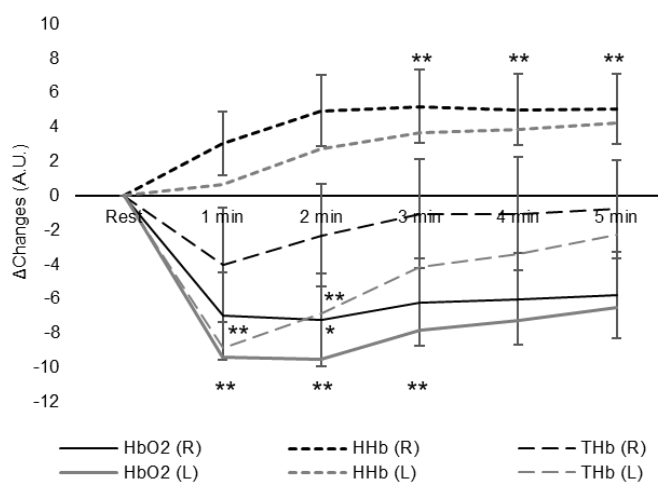


Figure 1 Evolution of ΔHbO_2 , ΔHHb and ΔTHb during the 5-minute exercise on the right paraspinal muscles (R; in black) and the left paraspinal muscles (L; in grey). Values are mean ± S.E.M. Significant difference from rest * p<0.05 ** p<0.001.

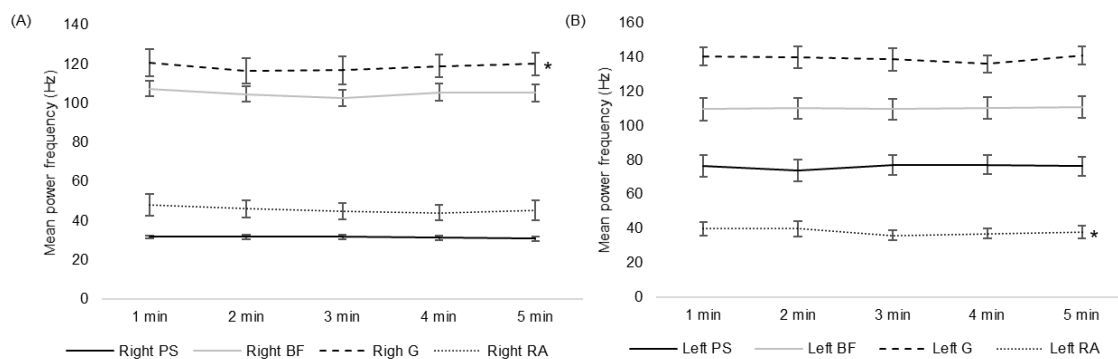


Figure 2 Mean power frequency (expressed in hertz) measured in (A) the right and (B) the left paraspinal muscles (PS), biceps femoris (BF), gastrocnemii (G) and rectus abdominis (RA). Values are mean ± S.E.M. Significant difference along exercise * p<0.05.

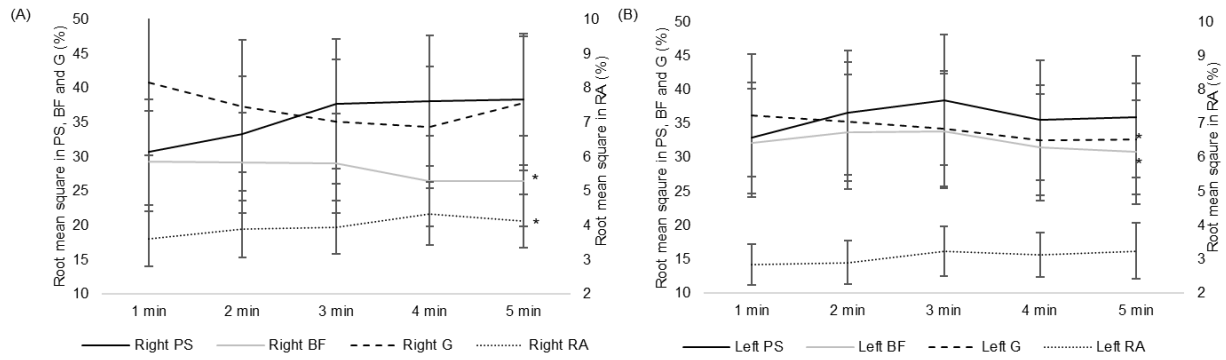


Figure 3 Root mean square (expressed in percent of the maximal root mean square recorded during maximal trunk flexion and extension) measured in (A) right and (B) left paraspinal muscles (PS), biceps femoris (BF), gastrocnemii (G) and rectus abdominis (RA). Values are mean \pm S.E.M. Significant difference along exercise * $p < 0.05$.

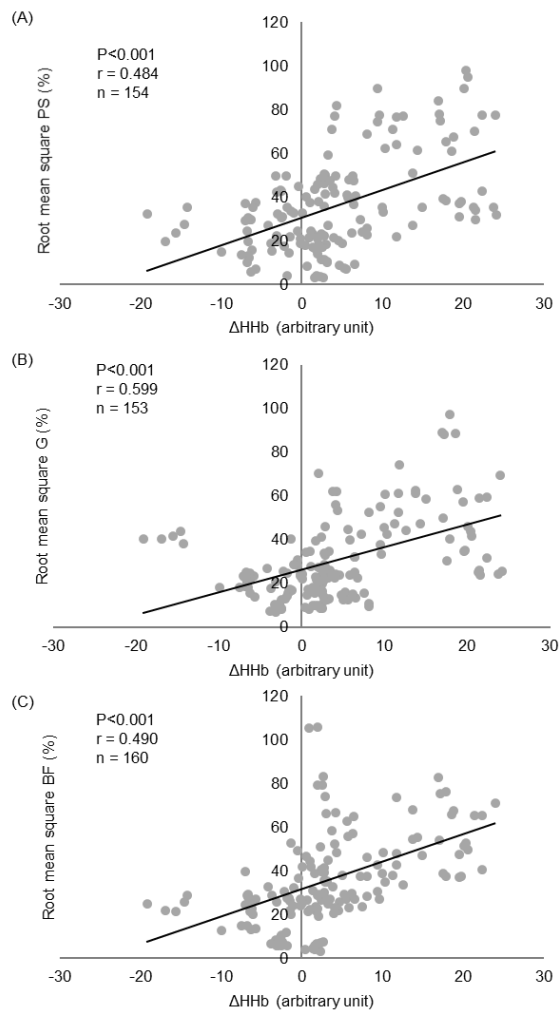


Figure 4 Relationship between Δ HHb values in paraspinal muscles and root-mean-square values in (A) paraspinal muscles (PS), (B) biceps femoris (BF) and (C) gastrocnemii (G)

Anthierens Agathe et al. Trunk Muscle Aerobic Metabolism ... Int J Sports Med 2019; 00: 00–00
**Trunk Muscle Aerobic Metabolism Responses in Endurance
Athletes, Combat Athletes and Untrained Men**

Authors

Agathe Anthierens¹, Nicolas Olivier¹, André Thevenon^{1,2}, Patrick Mucci¹

¹ Univ. Lille, Univ. Artois, Univ. Littoral Côte d'Opale, EA 7369 - URePSSS - Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société, Lille, France

² CHRU Lille, Service de Médecine Physique et de Réadaptation fonctionnelle, Lille, France

accepted 07.02.2019

DOI: <https://doi.org/10.1055/a-0856-7207>

Int J Sports Med 2019; 40: 1–6

© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York

ISSN 0172-4622

Abstract:

This study investigated aerobic metabolism responses in trunk muscles during a prolonged trunk extension exercise in athletes and untrained young men. The aim was to analyze the adaptations induced by 2 types of sports: one involving intensive use of trunk muscles (i. e., judo), and one known to induce high aerobic capacity in the whole body (i. e., cycling). Eleven judokas, 10 cyclists and 9 healthy untrained young men performed trunk extension exercises on an isokinetic dynamometer. During the first session, muscle strength was assessed during maximal trunk extension. During a second session, a 5-min exercise was performed to investigate aerobic responses with regard to trunk muscles. The near infrared spectroscopy technique and a gas exchange analyzer were used continuously to evaluate mechanical efficiency, $\dot{V}O_2$ on-set kinetics, trunk muscle deoxygenation and blood volume. Judokas showed greater trunk strength and mechanical efficiency ($p < 0.05$). Cyclists presented faster $\dot{V}O_2$ on-set kinetics ($p < 0.05$) and greater muscle deoxygenation and blood volume compared to untrained men ($p < 0.001$). These results suggest that practicing judo improves trunk extension efficiency whereas cycling accelerates aerobic pathways and enhances microvascular responses to trunk extension exercise. Sport practice improves aerobic metabolism responses in trunk extensor muscles differently, according to the training specificities.

Key words

aerobic exercise, VO_2 , near infrared spectroscopy, isokinetics, low back muscles

INTRODUCTION

Trunk extensor muscles are involved in common activities such as standing, walking and sitting. As postural muscles, they are continuously required for lumbar spine stability [10], in everyday tasks and in sport activities [13]. This muscle group is also involved in the first cause of chronic activity limitation, i.e. low back pain [15], characterized by a high level of fatigue in low back muscles. Therefore, fatigue in trunk extensor muscles is a performance and health factor [13,16]. Muscle fatigue may be due, at least in part, to a low level of aerobic capacity, which may depend on the adequacy of cardiorespiratory system responses [6] and/or muscle oxidative function [5] in order to satisfy the energy required for muscle contraction. In this context, it seems necessary to explore the aerobic pathways during contraction of the trunk extensor muscles in order to better understand the physiological limitations of this muscle group.

It is well known that physical training may alter aerobic metabolism during exercise across systemic improvement in O₂ supply, by changes in cardiovascular and respiratory systems, and/or local improvement in muscle capacity to utilize O₂ during exercise [27]. These types of physiological adaptations differ according to the training modalities [14]. Therefore, we may wonder whether aerobic training, well known to improve cardiovascular responses to exercise, is sufficient to modify trunk extensor muscle responses to local exercise. Or, if a more specific training involving intensively trunk muscles is needed to improve aerobic metabolism of this muscle group during exercise. This understanding could contribute to training optimization in order to reduce trunk muscle fatigability to exercise, but also to everyday tasks, for the prevention of back disorders.

On the one hand cycling training is recognized to improve the cardiovascular responses and leg aerobic metabolism during whole-body exercise [26]. But, in contrast to leg muscles, the trunk extensor muscles have a limited role in cycling, and the effect of cycling on the aerobic

responses of the trunk muscles to sustained contraction is unknown. On the other hand, judo involves intensive use of back muscles [2]. Judokas thus present greater trunk muscle strength and endurance, even compared to cyclists [20]. These functional benefits may be due to trunk muscle adaptations rather than cardiorespiratory ones, but it has not been investigated yet. Thus, we can hypothesize that cycling and judo would induce different aerobic pathway responses to trunk extension exercise: the first would improve the speed of aerobic responses because of fast cardiovascular adaptations, the second would permit greater trunk muscle efficiency because of their intensive use.

In this context, the aims of this study were, first, to identify if the practice of different sports is associated with specific changes in aerobic responses to trunk extension exercise, and second, to clarify the nature of these changes. We therefore proposed to investigate the muscle aerobic adaptations in well-trained men and the influence of the sport specialization, by comparing $\dot{V}O_2$ and trunk extensor muscle oxygenation responses during trunk extension exercise in judokas, cyclists and untrained young men.

MATERIALS AND METHODS

Participants

Thirty healthy individuals – ten cyclists, eleven judokas and nine untrained men – were included in this study (Table 1). Participants were men between the ages of 18 and 25 years old, without any history of cardiac, neural or metabolic disease, and without any antecedent of chronic low back pain or acute low back pain during the last three months. Cyclists (CY) cycled from 10 to 25 hours a week and took part in regional, national or international cycling competitive events. On average, they had practised cycling for 9.4 ± 1.8 years. Judokas (JU) were enrolled in a university team, did at least ten hours of sport a week including judo, performed specific core training, and took part in regional, national or international judo competitive events. They were all black belts, except three of them (one brown belt, one blue

belt and one orange belt). The last three were less experienced in judo, but they had practised other combat sports before, and/or done a lot of core training (i.e. strengthening trunk muscles) in association with judo for at least three years. On average, the group had practiced judo for 11.9 ± 1.4 years. Untrained men (UNT) were included after an interview to make sure they did no regular, intensive or structured physical activities. Informed consent was obtained from all individuals included in the study. All procedures performed were in accordance with 1964 Helsinki Declaration and with the International Journal of Sports Medicine's ethical standards [11].

Design

All volunteers performed two sessions of trunk extension exercises on an isokinetic dynamometer coupled with a specific trunk module moving in the sagittal plane (Con-trex® TP-1000, CMV AG, Switzerland). Data were acquired using the Con-trex software (Human kinetics® 1.7.5). During the first session, we evaluated trunk extensor muscle strength by maximal voluntary torque. One week later, individuals returned for a second session to evaluate the aerobic metabolism responses during a five-minute submaximal trunk extension exercise.

Before performing isokinetic exercise, each subject was positioned on the dynamometer as mentioned in the manufacturer's guidelines. Briefly, individuals were in an upright position, on a horizontal plate, with knees slightly flexed. Individuals were attached by a thigh pad, a tibial pad, a pelvic belt across the anterior superior iliac crest and a chest pad. The amplitude of the movement was set at 70° . The range of motion was approximately extended from 65° flexion to 5° extension from neutral position. All isokinetic evaluations were performed by the same investigator to assure the reliability of the results.

First session: Maximal voluntary torque measurement

In order to evaluate trunk extensor muscle strength, all volunteers performed three trunk extensions in concentric mode, at a speed of $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ [20]. The highest peak torque developed by trunk extensor muscles was selected after the application of a correction for gravitational forces.

Second session: Submaximal trunk extension exercise

During this session, the exercises were performed in continuous passive motion, allowing the imposition of a velocity during exercise ($60^{\circ} \cdot s^{-1}$ during extension, $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ during flexion), the flexion was passive and the extension was active in order to focus the mechanical work on the trunk extensor muscles. After a warm-up and familiarization phase, individuals accomplished three maximal trunk extensions. The work developed during each repetition was calculated by the Con-trex software (i.e. the area under the curve) in order to determine the workload intensity of the five-minute submaximal exercise. Then, a rest period was respected for 15 minutes, and individuals were equipped with a near-infrared spectroscopy (NIRS) optode and a pulmonary gas exchange analyzer.

The five-minute submaximal exercise was performed at 70% of the maximal work performed during one extension, as described above (i.e. 70% of the maximal area under the curve). This relative workload permitted to all participants to perform an intensity of exercise remaining constant during five minutes. In this way a physiologically steady state could be achieved. A biofeedback diagram was displayed, showing each movement cycle in real time. A green band represented the goal and individuals were asked to stay within this band. Total work (W_{tot}) performed by each individual was calculated by the dynamometer.

Trunk extensor muscle oxygenation measured by near infrared spectroscopy

Trunk extensor muscle oxygenation was assessed using a near-infrared spectroscopy device [29], composed of a main computer and a probe (Portamon, Artinis Medical Systems®, The Netherlands). The probe has a light source emitting near-infrared light at two different wavelengths; 760 nm and 850 nm, which account reciprocally for the absorbed light in muscle

by deoxygenated haemoglobin (Hb) and myoglobin (Mb) (HHb) and oxygenated Hb-Mb (HbO₂). The emitted light is absorbed or scattered within tissue, and part of the scattered light returns back through the skin to a detector, permitting to evaluate changes in muscle oxygenation. In the present study, we focused on HHb since it is closely associated to changes in O₂ extraction [8]. The sum of the changes in HHb + HbO₂, i.e. total Hb-Mb (THb), gives an indication of changes in muscle blood volume under the investigated zone [9].

The NIRS probe was placed 3 cm to the dominant side of the third lumbar vertebrae [17] and fixed by adhesive strapping and scratching belt. The inter-optode distance was 4 cm, allowing a 2 cm depth measurement. NIRS data were collected with a sampling frequency of 10 Hz.

Pulmonary gas exchange measurement

Continuous measurement of gas exchange was performed breath-by-breath, using a portable metabolic system (MetaMax® 3B, Cortex, Germany). Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) and carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$) were measured at rest and during the exercise. Prior to each test, the atmospheric pressure was calibrated using a barometer, the gas analyzers were calibrated from ambient gas (O₂:20.93%; CO₂: 0.03%) and from a gas mix of known content (O₂: 15.00%; CO₂: 5.00%), and the volume transducer was calibrated using a 3 L syringe. Before analysis, any values identified visually as outliers were removed.

Data analysis

Because of material constraints, one untrained man did not perform the submaximal isokinetic exercise, and pulmonary gas exchange values are missing for one cyclist and one untrained man.

HHb and THb values were averaged at rest and minute by minute during exercise. Then, we obtained ΔHHb and ΔTHb in normalizing exercise values by rest value.

Breath-by-breath $\dot{V}O_2$ and $\dot{V}CO_2$ values were averaged over the last minute of exercise to calculate the mechanical efficiency (ME), at the end of the exercise, as the ratio of mechanical work output by second over the energy expended (EE), using the formula of Brouwer as described by Moseley and Jeukendrup (2001) [25].

$$\text{Energy expenditure (J.s}^{-1}\text{)} = [(3.869 \times \dot{V}O_2) + (1.195 \times \dot{V}CO_2)] \times (4.186/60) \times 1000$$

$$\text{Mechanical efficiency (\%)} = [(W_{\text{tot}}/300) / \text{Energy expenditure}] \times 100$$

On-transient $\dot{V}O_2$ kinetics were modelled using a monoexponential equation, from the breath-by-breath $\dot{V}O_2$ values recorded during rest and exercise, interpolated to 1-s values:

$$\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(0)} + A (1 - e^{-(t-TD)/\tau})$$

where “ $\dot{V}O_{2(t)}$ ” represents the oxygen uptake at any moment of the exercise and “ $\dot{V}O_{2(0)}$ ” represents the value of $\dot{V}O_2$ measured at rest. “A” represents the difference between $\dot{V}O_{2(0)}$ and $\dot{V}O_2$ value at the steady state of the exercise. “TD” stands for the time delay, in other words the duration between the beginning of the exercise and the increase in $\dot{V}O_2$, and “ τ ” is the time constant, in other words the time required for $\dot{V}O_{2(0)}$ to achieve 63% of the steady state. The mean response time (MRT) is the sum of TD and τ .

Statistical analysis

Data are presented as mean \pm standard error of the mean (S.E.M.). Statistical analyses were performed using Sigmastat 3.5 software. One-way analysis of variance (ANOVA) were used to compare peak torque, total work, TD, τ , MRT, A, EE and ME between groups. Two-way repeated measures ANOVA were used to compare ΔHHb and ΔTHb amongst groups during the five-minute exercise. When differences were detected, Bonferroni’s post-hoc analysis was used to isolate the differences. Statistical differences were declared if $P < 0.05$. Eta squared (η^2) was used to determine the degree of association between groups and variables, and reported in tables. 0-0.19 corresponded to a trivial effect, 0.20-0.49 corresponded to a small

effect, 0.50-0.79 corresponded to a medium effect, 0.80 and greater corresponded to a large effect [4].

RESULTS

Trunk extensor muscle strength and total work during submaximal exercise

The peak torque developed during maximal trunk extension and the total work performed during the submaximal exercise were higher in judokas compared to cyclists ($P=0.025$; $P<0.001$) and untrained men ($P=0.011$; $P<0.001$) (Figure 1).

$\dot{V}O_2$ responses and trunk muscle oxygenation to submaximal exercise

During the exercise, the energy expenditure and the mechanical efficiency were higher in judokas compared to untrained men ($P=0.037$ and $P=0.007$) and cyclists ($P=0.041$; $P=0.016$). τ was lower in cyclists than in judokas ($P=0.005$), whereas MRT was lower in cyclists compared to judokas ($P=0.001$) and untrained men ($P=0.029$) (Table 2).

ΔHHb increased from the first minute of exercise in cyclists ($P<0.001$) and judokas ($P=0.020$) whereas it stayed unchanged in untrained men. ΔTHb decreased in all groups at the beginning of the exercise then it increased from the fourth minute only in cyclists ($P<0.001$). ΔHHb was higher in cyclists compared to untrained men from the third minute of exercise ($p=0.037$), as ΔTHb from the fourth minute of exercise ($p=0.041$) (Figure 2).

DISCUSSION

The aim of this study was to compare the muscle aerobic pathways during trunk extension exercise in healthy young men practising different types of physical activity (aerobic training vs more specific trunk muscle training). Untrained young men exhibited reduced aerobic responses to exercise than athletes. Aerobic responses to trunk extension exercise were different depending on athletes' group: in cyclists, $\dot{V}O_2$ mean response time was shorter, ΔHHb and ΔTHb were greater. Conversely, mechanical efficiency was higher in judokas.

Trunk extensor muscle strength

The present results indicate stronger trunk extensor muscles in judokas, in accordance with the study of Kort and Hendriks (1992). It has been well described that exercise training may induce hypertrophy of muscle cells enhancing muscle strength [14]. Nonetheless, cyclists' trunk extensor muscles did not appear stronger than those of untrained men. These results suggest that specific involvement of the trunk may be necessary to improve trunk extensor muscle strength, as during judo training or combat [2]. On the contrary, cycling seems insufficient to improve trunk muscle strength.

Kinetics of aerobic adjustments during 5-minute submaximal exercise

The mean trends in local blood volume (ΔTHb) and trunk muscle deoxygenation (ΔHHb) show two phases of responses. During the first phase, trunk extensions induced a decrease in muscle blood volume, and an increase in muscle O_2 extraction. The drop in ΔTHb has ever been underlined during trunk muscle contraction. This would be due to the increase in intramuscular pressure during trunk extension, causing a restriction in blood volume because of vessel compression [7,33]. This could even lead to a limitation of blood flow, as shown in a rat model [19]. Then, during a second phase, ΔTHb remained stable or increased.

ΔTHb does not increase during the exercise in untrained men and judokas. This suggests a lack of vascular adaptation to counterbalance the increase of intramuscular pressure during exercise. Conversely, cyclists are characterized by increase in ΔTHb indicating an increase in trunk muscle blood volume, which may induce an improvement in O_2 supply and permit the greater deoxygenation at the end of the exercise. This result suggests a better vascular control resulting in a greater vasodilatation [18] than in untrained men or judokas, permitting a greater blood volume in spite of intramuscular pressure. Thus, greater local blood volume and deoxygenation to exercise may be induced by endurance training [12]. In addition, studies have already reported the high inter-individuality differences in regard of the level of intramuscular

pressure, muscle oxygenation and fatigability to trunk extension exercise [22]. Our results support that this could be due in part to variabilities in sport practised.

Modelling $\dot{V}O_2$ kinetics during exercise as a single exponential function with a time delay provides information about the dynamic adjustment of physiological and metabolic processes. $\dot{V}O_2$ mean response time was lower in cyclists than in other groups. This indicates a faster adjustment in aerobic metabolism responses during trunk extension exercise [28]. The faster $\dot{V}O_2$ response in cyclists may be due to a faster O_2 supply and/or a faster muscle intracellular response of aerobic metabolism, e.g oxidative phosphorylation complexes [21]. We have measured ΔHHb trunk muscle responses to exercise, but this could not be modelled because of the huge inter-individual heterogeneity in the responses. But, through the minute-by-minute comparison, it appeared that it increased from the first minute in both athlete groups. This result suggests an increase in muscle O_2 extraction permit by intracellular responses of the aerobic pathways [1,24], in contrast to the untrained young men whose did not improve local volume nor muscle deoxygenation in regard of trunk muscles. However, it is still impossible to determine if the acceleration of the on-set $\dot{V}O_2$ kinetics in cyclists, is mostly influenced by the improvement in O_2 supply resulting of cardiovascular enhancement or of greater O_2 carrying capacity, which has not been documented here but which is known to be improved in endurance-trained individuals [23]. Also, this could be influenced by the earlier activation of the oxidative phosphorylation complexes.

Effect of sport specialization on trunk muscle efficiency

Muscles' O_2 needs increase during physical exercise, in order to synthesize the adenosine triphosphate necessary for muscle contraction. During trunk extension exercise, trunk extensor muscles are mainly involved. Thus, pulmonary $\dot{V}O_2$ reflects the oxygen consumption and energy expenditure in those muscles during the five-minute submaximal exercise [32].

For the first time, the present study investigated trunk extensor muscle efficiency. The greater energy expenditure in judokas, found in this study, is explained by the greater total work performed. However, judokas were also distinguished by a greater mechanical efficiency, indicating a lower O₂ cost to exercise, compared with cyclists and untrained men. We can hypothesize that lower O₂ cost could be attributed to a better oxidative efficiency in trunk muscles, which might be attributed to a higher mitochondrial content and/or function, associated to judo training [31]. Also, greater mechanical efficiency in judokas could be attributed to specific motor strategy. In one hand, it is recognized that trunk muscles are not the only muscles involved in trunk extension [3], hip extensor muscles play also a significant role. Secondly, lumbopelvic control strategy can be modified by training, and may induce changes in posterior chain muscles recruitment to trunk extension [30]. Therefore, we can hypothesize that in judokas, a specific motor strategy would influence mechanical efficiency to isokinetic trunk extension exercise. However, there is no data in the literature about this. In addition, this motor strategy which would potentially increase lower limb muscle recruitment, may induce a blood flow redistribution between the active muscle groups. This could partly explain the lack of hemodynamic adaptations in regards of trunk muscles, as suggested by the trend in Δ THb, in judokas. Obviously, all of these hypothetic mechanisms need further specific investigations.

CONCLUSION

This study supports the hypothesis that sport practice is associated to aerobic metabolism response improvements to trunk extension exercise. However, these adaptations differ according to the sport practised: Judo, in addition to strengthening trunk muscles, is associated to lesser O₂ needs, i.e. diminished O₂ cost to perform trunk extension exercise, improving mechanical efficiency. Cycling is associated to faster O₂ pathway responses to trunk extension exercise and greater trunk extensor muscle deoxygenation and local blood volume. If we consider that the capacity for muscles to perform prolonged tasks is partly related to

aerobic pathway contribution, this may suggest that the combination of endurance exercise training and more specific trunk muscle exercise training could be a useful way to prevent back muscle fatigability during everyday tasks, a potential cause of low back pain.

REFERENCES

- ¹ *Bailey SJ, Wilkerson DP, Dimenna FJ, Jones AM.* Influence of repeated sprint training on pulmonary O₂ uptake and muscle deoxygenation kinetics in humans. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 2009; 106: 1875–1887
- ² *Barbado D, Lopez-Valenciano A, Juan-Recio C, Montero-Carretero C, van Dieën JH, Vera-Garcia FJ.* Trunk Stability, Trunk Strength and Sport Performance Level in Judo. *PLoS One* 2016; 11: e0156267
- ³ *Clark BC, Manini TM, Mayer JM, Ploutz-Snyder LL, Graves JE.* Electromyographic activity of the lumbar and hip extensors during dynamic trunk extension exercise. *Arch Phys Med Rehabil* 2002; 83: 1547–1552
- ⁴ *Cohen J.* Statistical power analysis for the behavioral sciences. 2nd ed. Hillsdale, N.J: L. Erlbaum Associates, 1988
- ⁵ *Coyle EF.* Physiological determinants of endurance exercise performance. *J Sci Med Sport* 1999; 2: 181–189
- ⁶ *Dempsey JA, McKenzie DC, Haverkamp HC, Eldridge MW.* Update in the understanding of respiratory limitations to exercise performance in fit, active adults. *Chest* 2008; 134: 613–622
- ⁷ *Dupeyron A, Lecocq J, Vautravers P, Pélissier J, Perrey S.* Muscle oxygenation and intramuscular pressure related to posture and load in back muscles. *Spine J Off J North Am Spine Soc* 2009; 9: 754–759
- ⁸ *Ferrari M, Mottola L, Quaresima V.* Principles, Techniques, and Limitations of Near Infrared Spectroscopy. *Can J Appl Physiol* 2004; 29: 463–487
- ⁹ *Ferrari M, Muthalib M, Quaresima V.* The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci* 2011; 369: 4577–4590
- ¹⁰ *Granacher U, Gollhofer A, Hortobágyi T, Kressig RW, Muehlbauer T.* The importance of trunk muscle strength for balance, functional performance, and fall prevention in seniors: a systematic review. *Sports Med Auckl NZ* 2013; 43: 627–641
- ¹¹ *Harriss D, Macsween A, Atkinson G.* Standards for Ethics in Sport and Exercise Science Research: 2018 Update. *Int J Sports Med* 2017; 38: 1126–1131

- 12 *Heinicke K, Wolfarth B, Winchenbach P, Biermann B, Schmid A, Huber G, Friedmann B, Schmidt W.* Blood Volume and Hemoglobin Mass in Elite Athletes of Different Disciplines. *Int J Sports Med* 2001; 22: 504–512
- 13 *Hibbs AE, Thompson KG, French D, Wrigley A, Spears I.* Optimizing Performance by Improving Core Stability and Core Strength: *Sports Med* 2008; 38: 995–1008
- 14 *Holloszy JO, Booth FW.* Biochemical adaptations to endurance exercise in muscle. *Annu Rev Physiol* 1976; 38: 273–291
- 15 *Hoy D, March L, Brooks P, Blyth F, Woolf A, Bain C, Williams G, Smith E, Vos T, Barendregt J, Murray C, Burstein R, Buchbinder R.* The global burden of low back pain: estimates from the Global Burden of Disease 2010 study. *Ann Rheum Dis* 2014; 73: 968–974
- 16 *Imai A, Kaneoka K.* THE RELATIONSHIP BETWEEN TRUNK ENDURANCE PLANK TESTS AND ATHLETIC PERFORMANCE TESTS IN ADOLESCENT SOCCER PLAYERS. *Int J Sports Phys Ther* 2016; 11: 718–724
- 17 *Kell RT, Bhambhani Y.* In vivo erector spinae muscle blood volume and oxygenation measures during repetitive incremental lifting and lowering in chronic low back pain participants. *Spine* 2006; 31: 2630–2637
- 18 *Kime R, Im J, Moser D, Nioka S, Katsumura T, Chance B.* Noninvasive determination of exercise-induced vasodilation during bicycle exercise using near infrared spectroscopy. *Med Sci Monit Int Med J Exp Clin Res* 2009; 15: CR89-94
- 19 *Kobayashi Y, Sekiguchi M, Konno S-I, Kikuchi S-I.* Increased Intramuscular Pressure in Lumbar Paraspinal Muscles and Low Back Pain: Model Development and Expression of Substance P in the Dorsal Root Ganglion. *Spine* 2010; 35: 1423–1428
- 20 *Kort HD, Hendriks ERHA.* A comparison of selected isokinetic trunk strength parameters of elite male judo competitors and cyclists. *J Orthop Sports Phys Ther* 1992; 16: 92–96
- 21 *Korzeniewski B, Zoladz JA.* Biochemical background of the VO₂ on-kinetics in skeletal muscles. *J Physiol Sci JPS* 2006; 56: 1–12
- 22 *Kramer M, Dehner C, Hartwig E, Völker HU, Sterk J, Elbel M, Weikert E, Gerngross H, Kinzl L, Willy C.* Intramuscular pressure, tissue oxygenation and EMG fatigue measured during isometric fatigue-inducing contraction of the multifidus muscle. *Eur Spine J Off Publ Eur Spine Soc Eur Spinal Deform Soc Eur Sect Cerv Spine Res Soc* 2005; 14: 578–585
- 23 *Malczewska-Lenczowska J, Sitkowski D, Orysiak J, Pokrywka A, Szygula Z.* Total haemoglobin mass, blood volume and morphological indices among athletes from different sport disciplines. *Arch Med Sci* 2013; 5: 780–787
- 24 *McKay BR, Paterson DH, Kowalchuk JM.* Effect of short-term high-intensity interval training vs. continuous training on O₂ uptake kinetics, muscle deoxygenation, and exercise performance. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 2009; 107: 128–138

- 25 *Moseley L, Jeukendrup AE.* The reliability of cycling efficiency. *Med Sci Sports Exerc* 2001; 33: 621–627
- 26 *Mujika I, Padilla S.* Physiological and performance characteristics of male professional road cyclists. *Sports Med Auckl NZ* 2001; 31: 479–487
- 27 *Murias JM, Edwards JA, Paterson DH.* Effects of short-term training and detraining on VO₂ kinetics: Faster VO₂ kinetics response after one training session. *Scand J Med Sci Sports* 2016; 26: 620–629
- 28 *Phillips SM, Green HJ, MacDonald MJ, Hughson RL.* Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985 1995; 79: 1914–1920
- 29 *Quaresima V, Lepanto R, Ferrari M.* The use of near infrared spectroscopy in sports medicine. *J Sports Med Phys Fitness* 2003; 43: 1–13
- 30 *Van Oosterwijck J, De Ridder E, Vleeming A, Vanderstraeten G, Schouppe S, Danneels L.* Applying an active lumbopelvic control strategy during lumbar extension exercises: Effect on muscle recruitment patterns of the lumbopelvic region. *Hum Mov Sci* 2017; 54: 24–33
- 31 *Woo JS, Derleth C, Stratton JR, Levy WC.* The Influence of Age, Gender, and Training on Exercise Efficiency. *J Am Coll Cardiol* 2006; 47: 1049–1057
- 32 *Xu F, Rhodes EC.* Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med Auckl NZ* 1999; 27: 313–327
- 33 *Yoshitake, H. Ue, , M. Miyazaki, T. Moritani.* Assessment of lower-back muscle fatigue using electromyography, mechanomyography, and near-infrared spectroscopy. *Eur J Appl Physiol* 2001; 84: 174–179

Table 1 Physical characteristics in cyclists (CY), judokas (JU) and untrained young men (UNT)

	CY (n=10)	JU (n=11)	UNT (n=9)
Age (years)	20.30±0.68	19.73±0.38	23.11±0.39
Standing height (m)	1.76±0.02	1.80±0.02	1.80±0.02
Body mass (kg)	64.20±1.87	78.15±3.55	68.44±2.70
BMI (kg.m ⁻²)	20.81±0.40	24.04±0.65	21.12±0.72
Time of cycling/judo experience (years)	9.4±1.8	11.9±1.4	
Values are mean ± S.E.M (BMI: body mass index)			

Table 2 Comparison between groups in $\dot{V}O_2$ on-set kinetics and index of efficiency
 Values are mean ± S.E.M. Significant difference with UNT: * P<0.05; Significant difference with CY: † P<0.05 ††P<0.001; Significant difference with JU: ‡ P<0.05

	CY	JU	UNT	η²
EE (J.s ⁻¹)	689.48±53.87	860.12±36.55 *†	646.72±51.09	0.34
ME (%)	4.79±0.33	6.14±0.40 *†	4.28±0.51	0.33
A (L.min ⁻¹)	1.38±0.09	1.72±0.10	1.33±0.13	0.27
TD (s)	12.80±0.76	18.29±1.88	18.58±1.32	0.27
τ (s)	20.03±1.35 ‡	29.30±2.35	25.72±2.08	0.32
MRT (s)	32.83±2.04 *‡	47.59±2.99	44.29±2.58	0.42
Values are mean ± S.E.M. Significant difference with UNT: * P<0.05; Significant difference with CY: † P<0.05 ††P<0.001; Significant difference with JU: ‡ P<0.05 (EE: energy expenditure; ME: Mechanical Efficiency; A: Amplitude; TD: Time delay; τ: time constant; MRT: mean response time)				

Figure 1 – (A) Peak torque (N.m) developed during maximal trunk extension (maximal exercise) ($\eta^2 = 0.382$); and (B) total work (J) performed during submaximal exercise ($\eta^2 = 0.703$) (CY: dotted bar, JU: grey bar, UNT: black bar). Values are mean \pm S.E.M. Significant difference with UNT: * $P < 0.05$ ** $P < 0.001$; significant difference with CY: † $P < 0.05$ †† $P < 0.001$

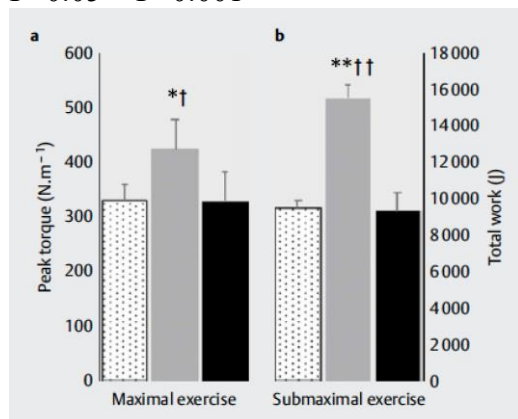
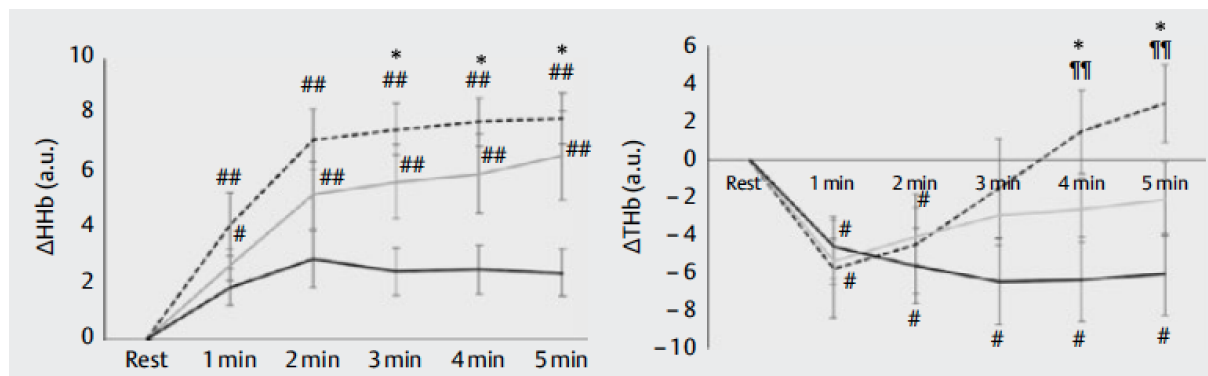


Figure 2 Evolution of Δ HHb ($\eta^2 = 0.18$) and Δ THb ($\eta^2 = 0.23$) during the 5-min exercise (CY: dotted line, JU: grey line, UNT: black line). Values are mean S.E.M. Significant difference with rest values: # $P < 0.05$ ## $P < 0.001$; Significant difference with 1min: ††† $P < 0.001$; Significant difference with UNT: * $P < 0.05$



Title : Benefits of a four-week functional restoration program in chronic low back pain patients and three-month follow-up: focus on paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercise

Authors :

Agathe Anthierens ^a

agatheanthierens@gmail.com

Nicolas Olivier ^a

nicolas.olivier@univ-lille.fr

André Thevenon ^{a,b}

andre.thevenon@chru-lille.fr

Patrick Mucci ^a

patrick.mucci@univ-lille.fr

^a Univ. Lille, Univ. Artois, Univ. Littoral Côte d'Opale, EA 7369 - URePSSS - Unité de Recherche Pluridisciplinaire Sport Santé Société, F-59000 Lille, France

^b CHRU Lille, Service de Médecine Physique et de Réadaptation fonctionnelle, 59000 Lille, France

Corresponding author : Agathe Anthierens

Email : agatheanthierens@gmail.com

Tel : +33374008207

Address : Eurasport

413, Avenue Eugène Avinée

59120 LOOS – France

This study was approved by the local Committee for the Protection of Persons (Comité de Protection des Personnes Nord Ouest IV - N° ID : 2016-A01151-50)

ABSTRACT

Study design: Longitudinal study

Background: Chronic low back pain (CLBP) is characterised by a high level of paraspinal muscle fatigability, which can be improved following a functional restoration program. Muscle fatigability can be partly related to impairment in aerobic metabolism responses.

Objective: We sought to investigate paraspinal aerobic metabolism during a standardised trunk extension exercise prior to and after a functional restoration program.

Method: Twenty-two CLBP patients were evaluated before and after a 4-week functional restoration program. Three months later, 12 patients were seen for a follow-up visit. During each testing session, patients performed a five-minute isokinetic trunk extension exercise, in addition to usual questionnaires and exercises designed to evaluate psychosocial and physical factors. During the five-minute exercise, pulmonary gas exchanges, paraspinal muscle oxygenation, and pain sensations were measured. Mechanical efficiency and on-set $\dot{V}O_2$ kinetics were also calculated.

Results: Increased pain sensation resulting from exercise did not occur after a four-week restoration program ($P>0.05$). At the end of the program, paraspinal muscle oxygenation, mechanical efficiency, and the $\dot{V}O_2$ on-set kinetics were improved during the five-minute trunk extension exercise ($P<0.05$). All measures remained the same during a three-month follow-up with the exception of paraspinal muscle oxygenation, which deteriorated ($P<0.05$). Return-to-work was associated with the level of workday physical activities and to a decrease in fear-avoidance beliefs.

Conclusion: Following the program, aerobic metabolism responses were improved in paraspinal muscles. These improvements were not associated with return-to-work, which was primarily influenced by socio-psychological factors.

Key words: low back pain, aerobic metabolism, mechanical efficiency, muscle oxygenation, return to work, isokinetic trunk extension

INTRODUCTION

Chronic low back pain (CLBP) is a condition that involves a high level of paraspinal muscle fatigability^{1,2}, leading to physical and psychological limitations. CLBP-induced muscle fatigability could be associated with an alteration in aerobic metabolism during paraspinal muscle contractions, in an attempt to satisfy muscular energy requirements for spine mobilization and stabilization³. An imbalance between muscle O₂ needs and utilization could limit aerobic metabolism and induce high level of paraspinal muscle fatigability.

Functional restoration programs for CLBP patients, described by Mayer & Gatchell⁴, have been recognized as being more effective than the traditional medical interventions. Restoration programs consist of multidisciplinary biopsychosocial care with an exercise therapy as the main component. These programs notably improve paraspinal muscle fatigability during exercise⁵, which may partly result from enhanced aerobic metabolism contribution as aerobic metabolism is a major factor in muscle endurance and can be improved by physical training⁶. However, the benefits are not always preserved following the return home and it is unclear if this is associated with psychosocial or physical factors.^{7,8}

The contribution of aerobic metabolism to exercise can be assessed by measurement of pulmonary gas exchanges in order to calculate on-set $\dot{V}O_2$ kinetics and mechanical efficiency. Muscle oxygenation can also be investigated using near infrared spectroscopy technique (NIRS)⁹. Surprisingly, pulmonary gas exchanges in CLBP during prolonged trunk extension exercise have never been reported in the literature and even less during a functional restoration program. Only one study has described paraspinal muscle oxygenation before and after a functional restoration program, and has demonstrated improvement during functional tasks following the program¹⁰. However, it was unclear if the muscle oxygenation changes identified in this study were associated with changes in metabolic responses or in muscle recruitment because of the freedom of motion. A trunk extension exercise using an isokinetic dynamometer

may be one method to limit this freedom of motion and to focus the mechanical work on paraspinal muscles, due to the high degree of movement standardization ¹¹.

The effects of a functional restoration program on paraspinal muscle metabolism during CLBP are still unclear. The aim of this study was to investigate paraspinal aerobic metabolism during an isokinetic trunk extension exercise before and after a four-week functional restoration program in CLBP patients. Additionally, a three-month follow-up will be used to determine if any potential benefits were preserved after returning to home, and if these benefits were related to returning to work.

METHODS

Participants

Participants included twenty-two voluntary subjects, aged between 26 and 55 years old, suffering from chronic low back pain for at least three months. The exclusion criteria included the following: persistent and very intense pain; pregnancy; sedentary individuals; and any antecedent of metabolic, cardiovascular, respiratory, or neurologic disease. All patients were referred by their physician to a four-week multidisciplinary functional restoration program. The care was administered about 15 hours per week. Care was composed of physical exercises, therapeutic education, and manipulations supervised by physicians, physiotherapists, occupational therapists, and adapted physical activity professionals. Additionally, patients were required to independently perform prescribed physical exercises each day. The protocol was set in accordance with the Helsinki Declaration and received the approval of the local Committee for the Protection of Persons. Written informed consent was obtained from all study patients.

Study design

Participants performed three testing sessions to evaluate physical and psychosocial factors. The first session (S1) was performed during the first week of hospitalization, and the second session (S2) was performed during the last week of hospitalization. Three months after

returning home, all study patients were invited to perform a half-day follow-up session. This session (S3) was designed to assay physical and psychosocial measures taken during S1 and S2. Patients were also asked about their professional activities since returning home.

Psychosocial factors

The perceived disabilities were evaluated using the EIFEL questionnaire at S1, S2, and S3¹². *CLBP incidence* was assessed at S1, S2, and S3 using the Dallas questionnaire, focusing on four items: daily activities, work and leisure activities, anxiety and depression, and sociability¹³. *Anxiety disorders and depression* during hospitalization were evaluated using the Hospital Anxiety Depression questionnaire (HAD) at S1 and S2¹⁴. *Pain-related fear* was evaluated using the Fear-Avoidance Beliefs Questionnaire (FABQ) at S1, S2, and S3, focusing on two items: the beliefs about professional activity (FABQ-Work) and those about physical activities (FABQ-PA)¹⁵. *Quality of life* was evaluated using the MOS 36-item Short-Form Health Survey (SF-36) at S1 and S3¹⁶.

Physical factors

Level of physical activity was evaluated using the Baecke questionnaire at S1 and S3, focusing on three items: physical activities at work, during sport activities, and during the leisure time¹⁷. *Paraspinal muscle fatigability* was determined using the Sorensen test at S1, S2, and S3¹⁸. The test was stopped when the patient was no longer able to hold the position, or for a maximum of 150 seconds which corresponds to the mean holding time of healthy individuals identified in a previous study¹⁹. *Paraspinal muscle strength* was evaluated at S1, S2, and S3 using an isokinetic dynamometer (Con-trex® TP-1000, CMV AG, Switzerland) associated to a specific trunk module in continuous passive motion. All isokinetic exercises used in this study consisted of trunk extensions with passive flexions. The flexions exercise velocity was fixed at $30^{\circ} \cdot s^{-1}$ against $60^{\circ} \cdot s^{-1}$ during the extensions. The range of motion was set at 70° (from 5° of extension to 65° of flexion from the neutral position for each individual). After a familiarization

and a warm up period, three maximal trunk extensions were performed to determine maximal peak torque as a maximal trunk extensor muscle strength measurement.

Aerobic metabolism responses to isokinetic trunk extension exercise. A 20-minute rest period occurred after paraspinal muscle strength measurement. Participants were then equipped with a pulmonary gas exchange analyser, a heart rate monitor, and one near-infrared spectroscopy probe positioned in regard to paraspinal muscles: 3 cm to the painful side of the third lumbar vertebra, or to the dominant side if the pain was bilateral. Patients then performed a five-minute isokinetic submaximal trunk extension exercise, corresponding to a constant setting torque of 80 N·m. It has been established that five minutes were sufficient to permit a fully aerobic metabolic contribution, and that 80 N·m corresponds to a performable and submaximal exercise level for CLBP patients (unpublished data). During this exercise, a biofeedback diagram was displayed in real time, showing the produced torque. On the same screen, a green band represented the desired intensity; patients were asked to perform the trunk extensions while staying inside this green band. At the end of the five-minute exercise, the total performed work (W_{tot}) was recorded by the Con-trex software (Human kinetics® 1.7.5).

During this trunk extension exercise several parameters were recorded and analysed:

Pulmonary gas exchanges and heart rate were assessed using a portable metabolic system (MetaMax® 3B, Cortex, Germany) coupled with a heart rate (HR) monitor (Polar Electro T31®, Finland). Oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), carbon dioxide production ($\dot{V}CO_2$), and ventilation ($\dot{V}E$) were measured breath-by-breath. Before each test, the gas analyser and volume transducer were calibrated. Any value visually considered as outliers were removed before data analysis. Breath-by-breath data for $\dot{V}O_2$ were interpolated to 1-s values in order to analyse the on-set kinetics adjustment for $\dot{V}O_2$ from the mono-exponential form: $\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2(0)} + A (1 - e^{-(t-TD)/\tau})$.

“ $\dot{V}O_{2(t)}$ ” represents the oxygen uptake at any moment of the exercise and “ $\dot{V}O_{2(0)}$ ” represents the value of $\dot{V}O_2$ at rest. “A” represents the difference between $\dot{V}O_{2(0)}$ and $\dot{V}O_2$ value at the steady state of the exercise. “TD” represents the time delay, while “ τ ” is the time constant, which is the time required for $\dot{V}O_{2(0)}$ to achieve 63% of the steady state.

Breath-by-breath $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$, and HR were averaged on the last minute of exercise for data analyses. $\dot{V}O_2$ and $\dot{V}CO_2$ averages were also used to calculate the energy expenditure (EE) during the last minute of exercise. Mechanical efficiency (ME) was calculated from the total work (W_{tot}) and EE, as described by Moseley and Jeukendrup (2001)²⁰: $EE (J.s^{-1}) = [(3.869 \times \dot{V}O_2) + (1.195 \times \dot{V}CO_2)] \times (4.186/60) \times 1000$, and $ME (\%) = [(W_{tot}/300) / EE\text{-exercise}] \times 100$.

Paraspinal muscle oxygenation was assessed using a probe emitting near-infrared light⁹ (Portamon, Artinis Medical Systems®, The Netherlands). The wavelengths emitted were 760 nm and 850, which represented the near-infrared light absorbed by deoxygenated haemoglobin (Hb) or myoglobin (Mb) and oxygenated Hb-Mb, respectively. Emitted light is scattered or absorbed, with the scattered light returning back to the receptor permitting identification of changes in deoxygenated Hb-Mb (ΔHHb) and oxygenated Hb-Mb (ΔHbO_2). The sum of the changes in oxy- and deoxygenated Hb-Mb represents the total Hb-Mb (ΔTHb), which is an indicator of the total blood volume under the investigated zone. Data were sampled at 10 Hz, averaged minute per minute, and normalised by rest values in order to identify changes produced by exercises.

Perceived pain in the low back was evaluated before and after the five-minute exercise using a visual analogue scale of pain. The scale ranged from zero (corresponding to "no pain at all") to 10 (corresponding to "worst pain imaginable").

Statistical analyses

Data are presented as mean \pm standard error of the mean (SEM). Because of the difference in sample size between S1 and S3, analyses were primarily performed between S1 and S2, followed by a comparison of S2 and S3. To compare the questionnaires' responses, time holding during Sorensen test, maximal peak torque, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$, HR, A, TD, τ and ME between two periods (S1 vs. S2 or S2 vs. S3), paired t-tests were used if the normality test was successful. Wilcoxon tests were used if the normality test failed. Two-way analysis of variance (ANOVA) with repeated measures was used to compare perceived pain in the low back, ΔHbO_2 , ΔHHb and ΔTHb (time of exercise per testing session). When differences were detected, Bonferroni's post-hoc analysis was used to isolate the differences. Student t-tests were used to analyse the factors associated with return to work at S3 (W: workers vs NW: non-workers). Statistically significant differences were declared if $P < 0.05$.

RESULTS

Participants

All the twenty-two CLBP patients performed evaluations at S1 and S2 (11 women, 11 men; 41.6 ± 1.8 years; 73.7 ± 3.1 kg; 1.74 ± 0.02 m). Only twelve participants (6 women, 6 men; 40.7 ± 2.6 years; 68.7 ± 2.9 kg; 1.71 ± 0.02 cm) performed the 3-month follow-up evaluations due to time constraints, severe pain, withdrawal of consent, or a missed appointment. Because patients did not complete each evaluation, the samples were different from one analysis factor to another; the sample is specified in figure and table captions.

Effects of a four-week functional restoration program

Psychosocial factor (Table 1). The outcomes of the EIFEL, Dallas, HAD-Anxiety, and FABQ questionnaires were improved at S2 compared with S1 ($P < 0.05$). The HAD-depression score was not statically different between S1 and S2.

Physical factors (Table 1). Holding time during the Sorensen test was improved at S2 compared with S1 ($P<0.05$). Maximal peak torque developed during maximal trunk extension was unchanged.

Responses to 5-minute isokinetic trunk extension exercise. At S1, perceived pain in the low back was higher after exercise ($P<0.001$), whereas there was no increase in pain following exercise at S2. At the end of the exercise, perceived pain was higher at S1 than S2 ($P=0.012$) (Figure 1).

At S1, there was a significant decrease in ΔHbO_2 and ΔTHb during the five-minute exercise compared to resting level ($P<0.05$). At S2, ΔHbO_2 was also reduced during exercise ($P<0.05$), whereas ΔTHb was unchanged compared to resting level. ΔHHb was significantly higher at S2 compared with S1 from the third minute of exercise ($P<0.05$) (Figure 2).

Analysis of the on-set $\dot{V}\text{O}_2$ kinetic revealed that τ was lower at S2 versus S1 ($P=0.036$). TD and A were unchanged (Figure 3). In the last minute of exercise, $\dot{V}\text{O}_2$, HR, and $\dot{V}\text{E}$ were unchanged between S1 and S2 ($\dot{V}\text{O}_2$: $n=21$; 1.31 ± 0.05 vs 1.25 ± 0.05 L.min⁻¹; HR: $n=20$; 133.06 ± 4.48 vs 129.63 ± 4.01 b.min⁻¹; $\dot{V}\text{E}$: $n=21$; 45.91 ± 2.61 vs 45.14 ± 2.66 L.min⁻¹). The mechanical efficiency was improved at S2 compared with S1 ($n=20$; 4.3 ± 0.13 vs 4.89 ± 0.20 %; $P=0.008$).

Three-month follow-up

Psychosocial factors. There was no significant change in questionnaire outcomes between S2 and S3 (Table 2). The SF-36 outcomes were improved at S3 compared with S1 (43.81 ± 3.31 vs 68.23 ± 4.71 %; $P<0.001$).

Physical factors (Table 2). There was no difference in maximal peak torque or holding time during the Sorensen test between S2 and S3. According to the Baecke questionnaire, the level of sport activity was increased at S3 compared with S1 (2.29 ± 0.25 vs 2.84 ± 0.23 ; $P=0.039$).

Responses to five-minute isokinetic trunk extension exercise. There was no significant change between S2 and S3 in perceived pain in the low back, mechanical efficiency, or the on-set $\dot{V}O_2$ kinetics during the five-minute trunk extension exercise (Table 2). However, ΔHbO_2 , ΔHHb , and ΔTHb were significantly lower at S3 than S2 ($P < 0.05$) (Figure 2).

Return to work. Among the twelve patients evaluated during the three-month follow-up, six returned to work (W), whereas the six others were waiting for work-adjustment or reconversion (NW). According to the Baecke questionnaire completed during S1, return to work was associated with a lower level of physical activity at work (W: 1.92 ± 0.44 vs NW: 3.76 ± 0.16 ; $P = 0.003$). It was also associated with a lower FABQ-Work outcome at S2 (W: 11.80 ± 3.01 vs NW: 29.00 ± 6.41 ; $P = 0.05$).

DISCUSSION

The aim of this study was to investigate paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercise in CLBP patients before and after a four-week functional restoration program, followed by an evaluation at three months post-program. Aerobic metabolism responses to prolonged trunk exercise were improved after the program. However, the benefits of paraspinal muscle oxygenation to exercise were altered three months after returning home.

It has been established that CLBP patients are characterised by pain sensations in the low back and a high level of paraspinal muscle fatigability leading to limitations in daily life. These novel results demonstrated that a four-week functional restoration program alleviated low back pain induced by prolonged trunk extension exercise. Prior to the program, low back pain was exacerbated after exercise; pain was not increased during exercise after completion of the program. In addition, the multidisciplinary program resulted in decreased paraspinal muscle fatigability and improved psychosocial condition of the patients. All of these benefits contributed to rehabilitating patients to daily tasks and normal activity²¹.

At the end of the program, $\dot{V}O_2$ on-set kinetics were faster than before the program, and

the mechanical efficiency, paraspinal muscle deoxygenation (ΔHHb), and blood volume (ΔTHb) were increased, suggesting benefits in the oxidative metabolism responses to exercise.

CLBP patients are characterised by a high proportion of fast-twitch fibres in paraspinal muscles, which are less resistant to fatigue and have a poorer oxidative capacity than slow-twitch fibres²². A four-week functional restoration program may have modified the muscle fibre type characteristics by increasing the proportion of slow-twitch muscle fibres, improving oxidative capacity, mechanical efficiency, and reducing muscle fatigability. However, even if the cross sectional area can be improved following exercise therapy, functional restoration programs have been insufficient to induce changes in fibre type distribution²³. Other structural or functional changes may have contributed to the improvement of aerobic metabolism.

Aerobic response changes may be explained by an increase in exercise blood supply between S1 and S2. The results of this study support this hypothesis. At S1, the drop in ΔTHb during exercise suggests a restriction of blood volume to the muscle, likely due to high intramuscular pressure in the paraspinal muscles²⁴. At S2, the drop in ΔTHb was not present, indicating that paraspinal blood volume was stable between rest and trunk extension exercise. This result suggests greater vasodilation or capillary recruitment during exercise after the program. These effects would result in an increase in paraspinal muscle blood volume during exercise, and may raise the exchange area between blood and muscle. This could induce greater muscle O_2 availability and extraction during exercise; this is supported by the increase in ΔHHb at S2. Haemodynamic improvement may also explain the faster $\dot{\text{V}}\text{O}_2$ on-set kinetics, which can be influenced by both O_2 supply and O_2 utilization.²⁵

This study demonstrated an increase in mechanical efficiency at S2 compared to S1. This increased efficiency may be explained by an improvement in the muscle aerobic pathway, which can induce a better ratio between ATP production and muscle work. This could also be

attributed to the changes in haemodynamics; the THb decreased, suggesting a limitation in blood volume during trunk extension, which could result in a restriction in muscle blood flow^{26,27}. As demonstrated in healthy individuals during cycle exercise, blood flow restriction may increase the aerobic and anaerobic metabolic contributions, leading to a greater energy expenditure and thus a decrease in mechanical efficiency^{28,29}. At S2, Δ THb did not decrease during exercise which could potentially be a result of improved muscle blood flow, removing effects of blood flow restriction on mechanical efficiency. In healthy individuals, the greater energy expenditure induced by blood flow restriction was associated with a greater solicitation of the cardiorespiratory system, but in our study, there was no difference in HR or $\dot{V}E$ between the two testing periods. Thus, the improvement in mechanical efficiency must be associated to other factors. Another explanation to considerer is the potential changes in neuromuscular solicitation, as the muscle activation can also be increased with blood flow restriction³⁰. Removal of blood flow restrictions at S2 could induce lower muscle implication and diminished O₂ needs, increasing motor efficiency. In other words, the neuromuscular implication would be more effective at S2.

Sensation of pain was exacerbated following exercise only at S1. As discussed above, the four-week restoration program enhanced aerobic metabolism and muscle blood volume, limiting the production of metabolites such as lactate or H⁺^{31,32}. The literature has reported that a decrease in pH and an increase in lactate concentration would induce a sensation of pain³³. If a four-week functional restoration program reduces muscle metabolite production, it can also limit low back pain in response to exercise.

Three months after the restoration program, the quality of life was improved compared with S1. Most of the program benefits were preserved at S3 with the exception of paraspinal muscle oxygenation in response to exercise; this was demonstrated by the reduction of Δ HbO₂, Δ HHb and Δ THb at S3 compared with S2. This could be a precursor of progressive

deterioration of the benefits conferred by the program. Muscle oxygenation in response to exercise may be influenced prior to other variables after returning home following the restoration program. The level of patients' physical activity following the program could be insufficient to preserve the program benefits. This is in contrast with other studies, where the level of activity was higher and the benefits were preserved³⁴. Moreover, in this study, patients declared practicing low intensity exercise following the program, essentially at home and unregularly during their free-time. Adhering to regular and structured activity may be a way to post-program rehabilitation more effective and help avoid the loss of benefits following the return home.

At the three-month follow-up, 50% of patients returned to work. Return to work was related to the work conditions. The individuals with a lower level of physical activity during their workdays, as measured by the Baecke questionnaire at S1, returned to work. This result could support ergonomic interventions or work adjustments for patients with a higher score for the Professional Activity entry on Baecke questionnaire. This could reduce the amount of time patients are inactive following the restoration program. Our results confirm that psychosocial approaches to patient care, notably with a focus in reducing pain-related fear, are effective as these factors have been shown to influence the ability to return to work²¹.

CONCLUSION

A four-week functional restoration program improves the contribution of muscular aerobic metabolism to trunk extension exercise in CLBP patients, but this benefit is only partially preserved three months after the return home. We expected that this improvement in the aerobic pathway would be a determinant of returning to work, but psychosocial factors and the level of physical activity related to the profession seem to also be important factors. This underlines the importance of a multidisciplinary approach to care for chronic low back pain.

Acknowledgments: The authors would like to thank all the study participants.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Références

1. Biering-Sørensen F. Physical measurements as risk indicators for low-back trouble over a one-year period. *Spine*. 1984;9(2):106-119.
2. Kankaanpää M, Taimela S, Laaksonen D, Hänninen O, Airaksinen O. Back and hip extensor fatigability in chronic low back pain patients and controls. *Arch Phys Med Rehabil*. 1998;79(4):412-417.
3. Kell RT, Bhambhani Y. In vivo erector spinae muscle blood volume and oxygenation measures during repetitive incremental lifting and lowering in chronic low back pain participants. *Spine*. 2006;31(22):2630-2637. doi:10.1097/01.brs.0000240647.57959.72
4. Mayer TG, Gatchel RJ. *Functional Restoration for Spinal Disorders: The Sports Medicine Approach*. Philadelphia: Lea & Febiger; 1988.
5. Kamper SJ, Apeldoorn AT, Chiarotto A, et al. Multidisciplinary biopsychosocial rehabilitation for chronic low back pain: Cochrane systematic review and meta-analysis. *BMJ*. 2015;350(feb18 5):h444-h444. doi:10.1136/bmj.h444
6. Murias JM, Kowalchuk JM, Paterson DH. Speeding of $\dot{V}O_2$ kinetics with endurance training in old and young men is associated with improved matching of local O_2 delivery to muscle O_2 utilization. *Journal of Applied Physiology*. 2010;108(4):913-922. doi:10.1152/jappphysiol.01355.2009
7. Poulain C, Kernéis S, Rozenberg S, Fautrel B, Bourgeois P, Foltz V. Long-term return to work after a functional restoration program for chronic low-back pain patients: a prospective study. *European Spine Journal*. 2010;19(7):1153-1161. doi:10.1007/s00586-010-1361-6
8. Verfaillie S, Delarue Y, Demangeon S, Beuret-Blanquart F. Évaluation à quatre ans d'un programme de reconditionnement à l'effort pour lombalgie chronique. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*. 2005;48(2):53-60. doi:10.1016/j.annrmp.2004.08.008
9. Ferrari M, Muthalib M, Quaresima V. The use of near-infrared spectroscopy in understanding skeletal muscle physiology: recent developments. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2011;369(1955):4577-4590. doi:10.1098/rsta.2011.0230
10. Olivier N, Thevenon A, Berthoin S, Prieur F. An exercise therapy program can increase oxygenation and blood volume of the erector spinae muscle during exercise in chronic low back pain patients. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2013;94(3):536-542.
11. Delitto A. Isokinetic dynamometry. *Muscle & Nerve*. 1990;13(S1):S53-S57. doi:10.1002/mus.880131317

12. Coste J, Le Parc JM, Berge E, Delecoeuillerie G, Paolaggi JB. [French validation of a disability rating scale for the evaluation of low back pain (EIFEL questionnaire)]. *Rev Rhum Ed Fr.* 1993;60(5):335-341.
13. Marty M, Blotman F, Avouac B, Rozenberg S, Valat JP. Validation of the French version of the Dallas Pain Questionnaire in chronic low back pain patients. *Rev Rhum Engl Ed.* 1998;65(2):126-134.
14. Zigmond AS, Snaith RP. The Hospital Anxiety and Depression Scale. *Acta Psychiatrica Scandinavica.* 1983;67(6):361-370. doi:10.1111/j.1600-0447.1983.tb09716.x
15. Waddell G, Newton M, Henderson I, Somerville D, Main CJ. A Fear-Avoidance Beliefs Questionnaire (FABQ) and the role of fear-avoidance beliefs in chronic low back pain and disability: *Pain.* 1993;52(2):157-168. doi:10.1016/0304-3959(93)90127-B
16. Ware JE, Sherbourne CD. The MOS 36-item short-form health survey (SF-36). I. Conceptual framework and item selection. *Med Care.* 1992;30(6):473-483.
17. Baecke JA, Burema J, Frijters JE. A short questionnaire for the measurement of habitual physical activity in epidemiological studies. *Am J Clin Nutr.* 1982;36(5):936-942. doi:10.1093/ajcn/36.5.936
18. Demoulin C, Vanderthommen M, Duysens C, Crielaard J-M. Spinal muscle evaluation using the Sorensen test: a critical appraisal of the literature. *Joint Bone Spine.* 2006;73(1):43-50. doi:10.1016/j.jbspin.2004.08.002
19. Hultman G, Nordin M, Saraste H, Ohls??n H. Body Composition, Endurance, Strength, Cross-sectional Area, and Density of MM Erector Spinae in Men With and Without Low Back Pain: *Journal of Spinal Disorders.* 1993;6(2):114???123. doi:10.1097/00002517-199304000-00004
20. Moseley L, Jeukendrup AE. The reliability of cycling efficiency. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(4):621-627.
21. Yahia A, Yangui N, Mallek A, Ghroubi S, Elleuch MH. Kinesiophobia, functional disability and physical deconditioning evaluation in chronic low back pain. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine.* 2017;60:e19-e20. doi:10.1016/j.rehab.2017.07.144
22. Mannion AF, Weber BR, Dvorak J, Grob D, Müntener M. Fibre type characteristics of the lumbar paraspinal muscles in normal healthy subjects and in patients with low back pain. *J Orthop Res.* 1997;15(6):881-887. doi:10.1002/jor.1100150614
23. Käser L, Mannion AF, Rhyner A, Weber E, Dvorak J, Müntener M. Active therapy for chronic low back pain: part 2. Effects on paraspinal muscle cross-sectional area, fiber type size, and distribution. *Spine.* 2001;26(8):909-919. doi:10.1097/00007632-200104150-00014
24. Dupeyron A, Lecocq J, Vautravers P, Pélissier J, Perrey S. Muscle oxygenation and intramuscular pressure related to posture and load in back muscles. *Spine J.* 2009;9(9):754-759. doi:10.1016/j.spinee.2009.04.005
25. Grassi B. Skeletal muscle VO₂ on-kinetics: set by O₂ delivery or by O₂ utilization? New insights into an old issue. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(1):108-116.

26. De Blasi RA, Ferrari M, Natali A, Conti G, Mega A, Gasparetto A. Noninvasive measurement of forearm blood flow and oxygen consumption by near-infrared spectroscopy. *J Appl Physiol.* 1994;76(3):1388-1393. doi:10.1152/jappl.1994.76.3.1388
27. Kobayashi Y, Sekiguchi M, Konno S-I, Kikuchi S-I. Increased Intramuscular Pressure in Lumbar Paraspinal Muscles and Low Back Pain: Model Development and Expression of Substance P in the Dorsal Root Ganglion. *Spine.* 2010;35(15):1423-1428. doi:10.1097/BRS.0b013e3181c645bb
28. Ozaki H, Brechue WF, Sakamaki M, et al. Metabolic and cardiovascular responses to upright cycle exercise with leg blood flow reduction. *J Sports Sci Med.* 2010;9(2):224-230.
29. Conceição MS, Gáspari AF, Ramkrapes APB, et al. Anaerobic metabolism induces greater total energy expenditure during exercise with blood flow restriction. Alway SE, ed. *PLOS ONE.* 2018;13(3):e0194776. doi:10.1371/journal.pone.0194776
30. Yasuda T, Brechue WF, Fujita T, Sato Y, Abe T. Muscle activation during low-intensity muscle contractions with varying levels of external limb compression. *J Sports Sci Med.* 2008;7(4):467-474.
31. Suga T, Okita K, Takada S, et al. Effect of multiple set on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *European Journal of Applied Physiology.* 2012;112(11):3915-3920. doi:10.1007/s00421-012-2377-x
32. Teixeira EL, Barroso R, Silva-Batista C, et al. Blood flow restriction increases metabolic stress but decreases muscle activation during high-load resistance exercise. *Muscle Nerve.* 2018;57(1):107-111. doi:10.1002/mus.25616
33. Pollak KA, Swenson JD, Vanhaitsma TA, et al. Exogenously applied muscle metabolites synergistically evoke sensations of muscle fatigue and pain in human subjects: Synergistic metabolites evoke muscle pain and fatigue. *Experimental Physiology.* 2014;99(2):368-380. doi:10.1113/expphysiol.2013.075812
34. Olivier N, Weissland T, Baeza J, Codron H, Trannoy V, Caby I. Bénéfices à court terme d'un programme de réentraînement à l'effort pour lombalgiques chroniques. *Science & Motricité.* 2007;(61):73-87. doi:10.3917/sm.061.0073

Table 1. Psychosocial and physical factors measured before (S1) and after the program (S2).

	N	S1	S2	P value
Psychosocial factors				
EIFEL	21	11.24 ± 0.76	5.57 ± 0.83	< 0.001
Dallas – DA	20	67.20 ± 2.58	40.35 ± 4.96	< 0.001
Dallas - W/L	20	67.30 ± 4.41	39.25 ± 5.74	< 0.001
Dallas – PSY	20	52.50 ± 5.87	28.75 ± 5.09	< 0.001
Dallas – SOCIAL	20	43.00 ± 4.27	27.25 ± 4.27	< 0.001
FABQ – Work	20	13.60 ± 1.35	7.45 ± 1.39	< 0.001
FABQ – PA	20	21.60 ± 2.43	17.10 ± 3.05	0.030
HAD-Anxiety	21	9.24 ± 0.72	7.38 ± 0.76	0.008
HAD-Depression	21	6.48 ± 0.81	5.57 ± 0.96	0.209
Physical factors				
Maximal peak torque (N·m)	22	234.20 ± 14.67	233.96 ± 14.57	0.983
Biering-Sorensen test (s)	21	79.33 ± 9.64	117.24 ± 7.06	< 0.001

Values are mean SEM. (DA: daily activities; W/L: work and leisure time; PSY: psychological condition; SOCIAL: sociability; PA: physical activity)

Table 2. Psychosocial factors, physical factors, and cardiorespiratory and metabolic responses to exercise measured after the program (S2), and at the 3-month follow-up (S3).

	N	S2	S3	P value
Psychosocial factors				
EIFEL	11	6.18 ± 1.19	4.82 ± 1.10	0.410
Dallas - W/L	11	45.45 ± 8.32	41.82 ± 5.59	0.677
Dallas – PSY	11	32.27 ± 7.64	33.64 ± 8.29	0.866
Dallas – SOCIAL	11	31.36 ± 6.11	28.64 ± 6.03	0.674
FABQ – Work	11	21.18 ± 4.49	22.36 ± 4.03	0.688
FABQ – PA	11	7.36 ± 2.03	5.36 ± 1.74	0.625
Physical factors				
Maximal peak torque (N·m)	12	244.43 ±	231.61 ±	
	9	21.30	22.03	0.253
		107.56 ±		
Biering-Sorensen test (s)		12.02	95.78 ± 9.11	0.373
Responses to submaximal exercise				
Mechanical efficiency (%)	10	4.86 ± 0.20	4.89 ± 0.26	0.189
$\dot{V}O_2$ amplitude (L.min ⁻¹)	11	0.94 ± 0.05	0.91 ± 0.05	0.349
$\dot{V}O_2$ on-set time delay (s)	11	14.10 ± 2.09	18.79 ± 1.31	0.066
$\dot{V}O_2$ on-set time constant (s)	11	25.55 ± 1.66	26.81 ± 0.94	0.389
$\dot{V}O_2$ (L.min ⁻¹)	11	1.20 ± 0.05	1.14 ± 0.05	0.178
Heart rate (beats.min ⁻¹)	10	133.03 ± 4.35	128.16 ± 5.76	0.342
Ventilation (L.min ⁻¹)	11	45.34 ± 3.81	42.17 ± 3.03	0.041
Pain pre-exercise (cm)	12	1.18 ± 0.46	0.93 ± 0.52	0.274
Pain post-exercise (cm)	12	1.44 ± 0.47	1.40 ± 0.57	0.274

Values are mean SEM. (DA: daily activities; W/L: work and leisure time; PSY: psychological condition; SOCIAL: sociability; PA: physical activity).

FIGURE 1. Level of pain perceived before (0-min) and after (5-min) the five-minute exercise, before (■) and after (■) the program (n=22). Values are mean \pm SEM. Significant difference:

* $P < 0.05$

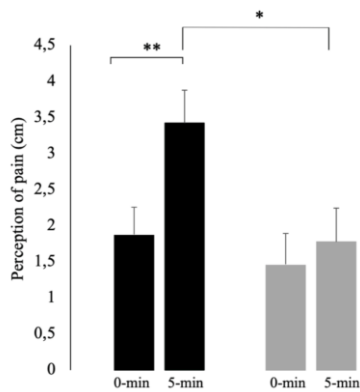


FIGURE 2. Changes in HbO₂, HHb, and THb during the 5-minute exercise before (S1), after (S2), and at three months after the program (S3). Values are mean \pm SEM. Significant difference with rest values: $P < 0.05$ α $P < 0.001$; Significant difference with S2: * $P < 0.05$.

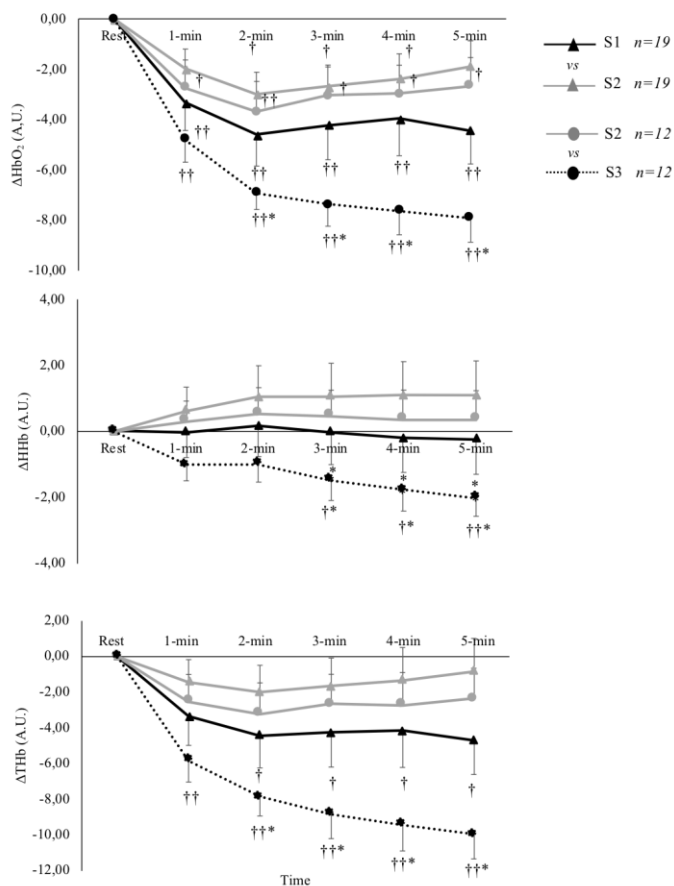
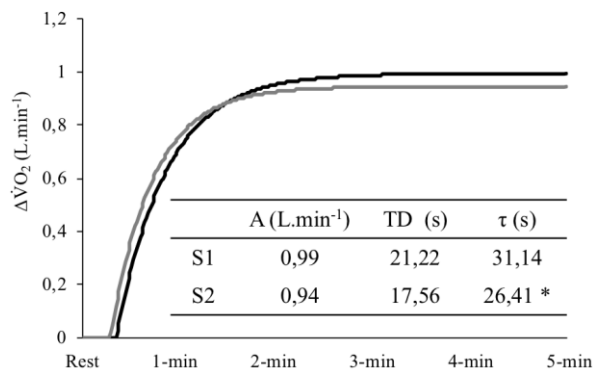
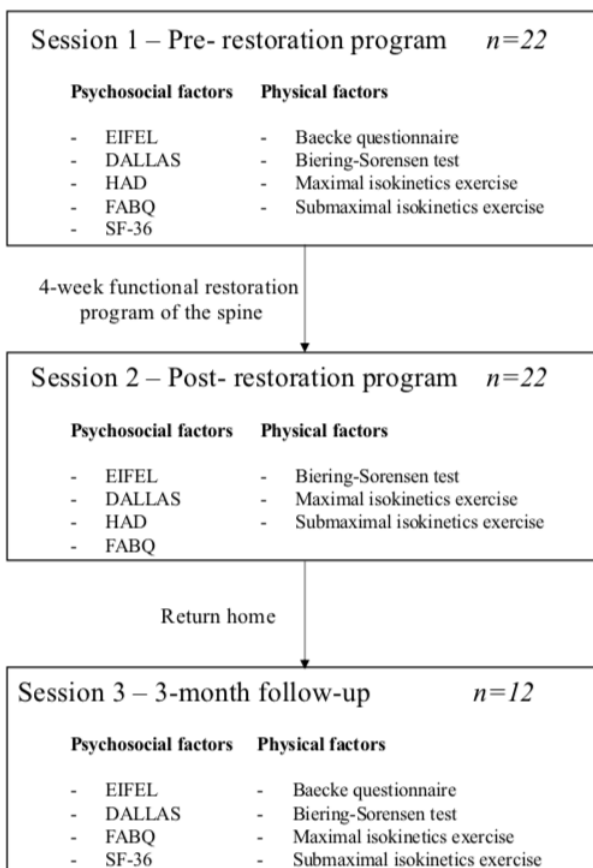


FIGURE 3. On-set $\dot{V}O_2$ kinetics before (-) and after (-) the program (n=20). (A: amplitude; TD: time delay; τ : time constant). Values are mean \pm SEM. Significant difference with S1: *P<0.05



Complementary files: *FIGURE A*. Study design



REPONSES HEMODYNAMIQUES ET METABOLIQUES DES MUSCLES PARAVERTEBRAUX A L'EXERCICE: INFLUENCE DE LA LOMBALGIE CHRONIQUE ET DE LA PRATIQUE D'ACTIVITES PHYSIQUES

Introduction : Les muscles paravertébraux interviennent en permanence dans les tâches de la vie quotidienne pour la stabilisation et la mobilisation du rachis. Cela nécessite la contribution du métabolisme aérobie musculaire. La lombalgie chronique est caractérisée par un haut niveau de fatigabilité et des sensations de douleur au regard des muscles paravertébraux, qui pourraient être en partie attribués à l'altération des réponses du métabolisme aérobie musculaire, tandis que la pratique d'activités physiques et sportives (APS) pourrait améliorer ces réponses.

Objectif : L'objectif général était de déterminer la spécificité des réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux chez des patients lombalgiques chroniques, avant et après un programme de restauration fonctionnelle, et chez différents athlètes en bonne santé.

Méthode : Quatre études ont été menées. Chaque participant a effectué des exercices isocinétiques sous-maximaux d'extension du tronc pendant cinq minutes, afin d'évaluer les réponses du métabolisme aérobie des muscles paravertébraux à l'exercice. Des sujets lombalgiques chroniques ont été appariés et comparés à des sujets sains, puis suivis au cours d'un programme de restauration fonctionnelle, dont la principale composante était l'exercice physique. Des sujets jeunes et en bonne santé, sportifs et non sportifs, ont été comparés entre eux.

Résultats/Conclusion : Chez les lombalgiques chroniques, le programme de restauration fonctionnel a permis une accélération des cinétiques de $\dot{V}O_2$, une augmentation de l'oxygénation musculaire, et une augmentation de l'efficacité mécanique à l'exercice. Chez les jeunes sportifs, les réponses aérobies étaient aussi améliorées, et la modification de ces réponses était dépendante des modalités d'entraînement. Ces résultats suggèrent que la pratique d'APS améliore la contribution du métabolisme aérobie au cours d'un exercice prolongé d'extension du tronc, au regard des muscles paravertébraux. Il n'y avait pas de différence entre les réponses métaboliques et hémodynamiques à l'exercice des lombalgiques chroniques, et celles des sujets sains, malgré un faible niveau de force maximale, et un haut niveau de fatigabilité musculaire à l'exercice chez les lombalgiques chroniques. Bien que les résultats préliminaires ne témoignent pas d'une altération des réponses chez les lombalgiques chroniques, nos travaux suggèrent que la pratique d'activités physiques pourrait diminuer le niveau de fatigabilité des muscles paravertébraux, et ainsi limiter les risques de blessure et de contre-performance, en améliorant les réponses aérobies à l'exercice.

Mots clés : *Muscles paravertébraux, métabolisme aérobie musculaire, extension du tronc, lombalgie chronique, programme de restauration fonctionnelle, activités physiques*

HEMODYNAMIC AND METABOLIC RESPONSES TO EXERCISE IN PARASPINAL MUSCLES: INFLUENCE OF CHRONIC LOW BACK PAIN AND OF THE PRACTICE OF PHYSICAL ACTIVITY

Introduction: Paraspinal muscles are required continuously during daily tasks for trunk stabilization and mobilization. For this, aerobic metabolism muscle contribution is required. Chronic low back pain is characterized by a high level of fatigability and pain sensations in regard to paraspinal muscles. These symptoms may be attributed to an alteration in aerobic metabolism responses. Conversely, practising physical and sports activities (PSA) could improve these responses.

Objective: The main objective was to determine the specificities in aerobic metabolism responses in regard to paraspinal muscles, in chronic low back pain patients following a functional restoration program and in healthy athletes.

Method: Four studies have been conducted. Participants performed submaximal trunk extension exercises on an isokinetic dynamometer for five minutes, to assess paraspinal muscle aerobic metabolism responses to exercises. Chronic low back pain patients were paired with and compared to healthy individuals and followed during a functional restoration program, in which physical exercise was the main component. Also, healthy young individuals, with and without sport specialization, were compared with each other.

Results/Conclusion: In chronic low back pain patients, the functional restoration program allows an acceleration in $\dot{V}O_2$ kinetics, an increase in paraspinal muscle oxygenation, and an increase in mechanical efficiency to exercise. In young athletes, the aerobic responses were also improved, and the changes in responses depended on the training modalities. Practising SPA enhances the aerobic metabolism contribution during prolonged trunk extension exercise, in regard to paraspinal muscles. There was no difference in aerobic metabolism responses between the chronic low back pain patients and the healthy individuals, despite weak levels of maximal strength and high levels of muscle fatigability when exercising (for the chronic lower back pain patients). Although the preliminary results did not attest to an alteration in aerobic responses in chronic low back pain patients, our results suggest that practising physical activities could limit paraspinal muscle fatigability, which could be a way to prevent injury and disappointing performances, by improving aerobic metabolism responses to exercise.

Key words: *Paraspinal muscles, muscle aerobic responses, trunk extension, low back pain, restoration program, physical activities*