

Evaluation objective et subjective d'un exosquelette passif des membres supérieurs

B. LE TELLIER^{a*}, T. ALBOUY^a, K. LEBEL^a

^a Ergosanté – 28 ZA de Labahou, Anduze, France

* b.letellier@ergosante.fr

RESUME

L'objectif de cette étude consistait à évaluer le Hapo ms, un exosquelette passif des membres supérieurs développé pour assister les travailleurs pour des tâches avec les bras devant soi. Douze participants ont dû réaliser une tâche statique, une tâche de manipulation manuelle et une tâche de port de charge, avec et sans exosquelette. Dans chacun des cas, des critères subjectifs (effort perçu des bras et du dos, confort) et objectifs (activité musculaire, équilibre postural) ont été évalués. Les résultats ont notamment montré une diminution de l'activité musculaire du deltoïde antérieur (-12% à -18% suivant la tâche réalisée) et du biceps brachial (-19% à -33% suivant la tâche). Aucune différence significative n'a été relevée au niveau des muscles du dos. L'équilibre postural n'a pas non plus été perturbé de manière significative du fait du port de l'exosquelette. Par ailleurs, une réduction de l'effort perçu a été observée pour l'ensemble des trois tâches (sauf pour la zone dorso-lombaire lors de la tâche 1). Pour conclure, le Hapo ms semble bien adapté pour assister les membres supérieurs lors de travaux avec les bras devant soi.

Mots clés : TMS, Exosquelette, Assistance des membres supérieurs, EMG, Test d'équilibre, Questionnaire subjectif

INTRODUCTION

La société et le travail ne cessent d'évoluer. Bien que de nombreux emplois aient été automatisés, d'autres nécessitent toujours une intervention humaine engendrant parfois l'apparition de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) [1][2]. Sur l'ensemble des TMS liés à une activité professionnelle répertoriés en 2012 aux Etats-Unis, les blessures du dos et des épaules représentaient respectivement 41,2% et 13,6% [3]. D'après les résultats de la 6ème enquête d'Eurofund publiés en 2017, une tendance similaire a pu être observée en Europe : les principaux TMS rapportés par les travailleurs concernent le mal de dos (43%) et les douleurs du cou ou des membres supérieurs (41%) [4].

Les TMS d'origine professionnelle n'ont pas seulement un impact sur les salariés (problèmes physiques et/ou psychologiques, précarité...), mais aussi pour les entreprises (absentéisme, renouvellement du personnel, perte de productivité, diminution de la qualité des produits...) [5]. Depuis 2020, l'Agence Européenne pour la Sécurité et la Santé au Travail (EUOSHA) a

lancé une campagne pour sensibiliser les employeurs, les travailleurs et toutes les parties prenantes de l'économie européenne aux TMS d'origine professionnelle et à leur prévention.

Une des solutions permettant de réduire le risque d'apparition de TMS consiste à fournir aux travailleurs des Dispositifs d'Assistance Physique (DAP) tels que des exosquelettes. Initialement développés pour la rééducation médicale ou à des fins militaires, des solutions innovantes ont ensuite été développées pour répondre aux besoins des industriels [6][7][8][9]. Au cours des dernières années, différentes technologies ont été investiguées par les fabricants : les exosquelettes dits « actifs » fonctionnent avec des actionneurs ou des moteurs alors que les exosquelettes dits « passifs » utilisent le principe de conservation de l'énergie stockée dans des bandes élastiques ou des ressorts en composite [10].

Bien que l'utilisation d'exosquelettes semble bénéfique pour les travailleurs (réduction de l'activité musculaire par exemple) [11][12][13], d'autres études ont montré que ces technologies pouvaient aussi engendrer de l'inconfort ou des troubles physiques [10][14]. Theurel *et al.* ont

notamment souligné trois limites majeures aux précédentes évaluations scientifiques des exosquelettes des membres supérieurs [15]. Premièrement, la plupart des études se sont uniquement focalisées sur des tâches avec les mains au-dessus de la tête (pas d'investigation pour les tâches de manipulation d'objet face à soi). Deuxièmement, une réduction de l'activité musculaire des épaules n'implique pas nécessairement à une diminution du risque de TMS (il semblerait toutefois que l'utilisation d'un DAP pour une flexion de l'épaule inférieure à 90° pourrait limiter les contraintes mécaniques à l'origine de la tendinopathie au niveau sous-acromial). Troisièmement, il n'y a pas de consensus sur le fait que les exosquelettes des membres supérieurs puissent avoir (ou non) un impact sur les muscles du dos. Par ailleurs, l'INRS a montré que les DAP des épaules pouvaient également perturber l'équilibre postural du travailleur, en particulier pour les tâches de manipulation manuelle de charge de moins de 5 kg [16].

Etant donné qu'il n'existe pas encore de norme spécifique à laquelle se référer, les exosquelettes doivent être évalués *via* une approche globale, à savoir vis-à-vis de critères subjectifs (effort perçu, confort...) et objectifs (activité musculaire, équilibre...). L'objectif de cette étude scientifique consiste donc à évaluer un nouvel exosquelette industriel qui a été développé pour apporter une assistance physique des membres supérieurs lors de tâches avec les bras devant soi. Les limites citées précédemment ont notamment été prises en considération, raison pour laquelle il a été décidé d'analyser à la fois les muscles agonistes et antagonistes, y compris ceux qui ne bénéficient pas directement de l'assistance physique de l'exosquelette.

PROTOCOLE

Participants

Douze sujets adultes en bonne santé (5 femmes et 7 hommes), droitiers et sans antécédent de troubles neuromusculaires ont été sélectionnés pour participer à cette étude. L'âge, la taille et la masse moyens sont les suivants : $30,3 \pm 9,9$ ans, $172,4 \pm 11,1$ cm, et $71,0 \pm 17,4$ kg. Il avait été demandé aux participants de ne pas effectuer d'activité physique intense au moins les deux jours précédant

l'expérience afin d'éviter le risque de fatigue musculaire. Tous les participants ont par ailleurs donné leur consentement éclairé écrit et oral avant de commencer l'étude.

Plan expérimental

Trois tâches représentatives de travaux pouvant nécessiter une assistance des membres supérieurs ont été considérées au cours des expériences. Chaque tâche a été réalisée en laboratoire sous deux conditions : avec et sans exosquelette.

La première tâche, statique, visait à reproduire des travaux avec les mains au-dessus de la tête. Les participants devaient rester 35 secondes avec leurs bras formant un angle de 105° avec le tronc, tout en tenant 1 kg dans chaque main. Un trépied ajustable a été utilisé pendant les essais afin de s'assurer que les participants maintenaient bien leurs bras suivant l'angle requis (Figure 1).



Figure 1 : tâche statique avec les bras à 105°, 1 kg dans chaque main

La seconde tâche était représentative d'un travail de manipulation manuelle avec les bras en avant du corps. Les participants étaient debout, face à une table dont la hauteur du piétement était ajustée pour que le plateau soit situé à 5 cm sous le sternum des participants. Il a été demandé aux participants de saisir des poids (6x 1kg + 2x 2kg) un par un et de les déplacer sur la table de gauche à droite, puis de droite à gauche (Figure 2). Cette tâche a été réalisée 3 fois avec la main droite puis trois fois avec la main gauche.



Figure 2 : tâche de manipulation manuelle de poids (6 x 1 kg + 2 x 2 kg) déplacés (a) de gauche à droite ; (b) de droite à gauche

La dernière tâche consistait à transporter une charge de 6 kg entre deux endroits (Figure 3). Elle a été choisie pour répliquer des situations de travail au cours de laquelle le travailleur serait ponctuellement amené à devoir prendre une charge (outils, objet, pièce...) et la ramener à son poste pour continuer son travail. Les participants de l'étude devaient donc prendre une charge sur la table (ajustée à la même hauteur que pour la Tâche 2), se retourner et marcher 3 mètres (en ligne droite) pour la déposer sur une chaise (assise de 50 cm de haut) et se redresser. Ils devaient se baisser à nouveau pour récupérer la charge, se redresser et la rapporter sur la table. Cette tâche était répétée 10 fois de suite.

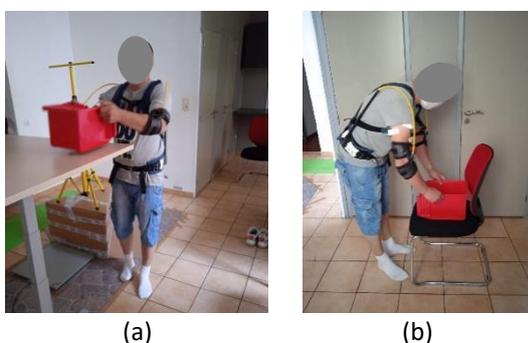


Figure 3 : tâche dynamique de transport d'une charge de 6 kg entre (a) une table et (b) une chaise distante de 3 m

Procédure

A leur arrivée au laboratoire, les participants étaient accueillis et informés à la fois de l'objectif et du protocole de test. Les participants étaient invités à poser toutes les questions qu'ils souhaitaient dans le but de les rendre plus confiants et détendus avant de commencer l'expérimentation.

La première étape a consisté à placer les capteurs EMG sur 6 muscles (deltoïde antérieur, biceps brachial, grand pectoral, triceps brachial, longissimus et grand dorsal) conformément aux recommandations du SENIAM [17]. Les

Contractions Volontaires Maximales (CVM) de chaque muscle ont ensuite été enregistrées trois fois lors de contractions isométriques de 5 secondes, suivies de 45 secondes de repos. Selon Burden [18], les valeurs de CVM permettent de normaliser les mesures de l'activité musculaire et ainsi pouvoir comparer les résultats entre les participants. Enfin, il a été demandé aux participants de faire quelques essais de chaque tâche pour s'assurer qu'ils avaient parfaitement compris le protocole.

Deux conditions ont été considérées aux cours des expérimentations : avec et sans exosquelette. Chaque participant avait préalablement été assigné à un groupe définissant l'ordre de réalisation des essais (d'abord avec puis sans exosquelette ou d'abord sans puis avec exosquelette). Une pause de 10 min a été accordée aux participants entre chaque condition pour éviter tout biais relatif à une fatigue physique. Dans les deux cas, les trois tâches ont été réalisées dans le même ordre pour tous les participants : d'abord la tâche statique avec les mains au-dessus de la tête, ensuite la tâche de manipulation manuelle et enfin la tâche de transport de charge. La réalisation des différentes tâches était également séparée par une pause de 5 minutes.

Equipement et instrumentation

Exosquelette

Le Hapo ms est un exosquelette passif, léger (1,3 kg) développé par Ergosanté dans le but d'apporter une assistance physique des membres supérieurs lors de travaux avec les bras en avant du corps. Ce DAP apporte une assistance pour toutes les tâches réalisées suivant une plage angulaire verticale de 0° à 135° et une plage angulaire horizontale de 180° (de -90° à +90°). Le Hapo ms est constitué de 3 principaux sous-ensembles (Figure 4) :

- Un harnais qui se porte comme un sac à dos,
- Deux ressorts (un pour chaque bras) en matériau composite (fibre de verre),
- Deux interfaces doubles qui maintiennent le bras et l'avant-bras de part et d'autre de l'articulation du coude.

Il existe deux versions de l'exosquelette définies en fonction de la raideur des ressorts en composite (assistance jusqu'à 4 kg ou assistance jusqu'à 6 kg). Le choix de la raideur des ressorts dépend à la fois du type de travail (fréquence, durée, hauteur des

bras...), de la morphologie de l'utilisateur et de sa préférence personnelle. Dans le cadre de cette expérimentation, il a été choisi arbitrairement d'évaluer l'exosquelette avec les ressorts de plus faible raideur (assistance jusqu'à 4 kg).



Figure 4 : vue latérale du Hapo ms : (1) Harnais ; (2) Ressorts en composite ; (3) Interface double

Après avoir été enfilé comme un sac à dos, le Hapo ms doit être ajusté à la morphologie de l'utilisateur. Plusieurs sangles permettent de régler la taille du harnais tandis que la hauteur des ressorts est adaptée en hauteur à l'aide des tubes télescopiques. Les interfaces doubles sont ensuite attachées au bras et à l'avant-bras au niveau du coude.

Electromyographie de surface

Les données d'électromyographie de surface (EMG) ont été enregistrées à une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz à l'aide de capteurs quadripolaires Trigno Avanti (DELSYS) pour les trois tâches (uniquement le côté droit du corps). La transmission des signaux EMG a été réalisée via le réseau Wifi interne, et l'acquisition a été réalisée avec le logiciel EMGworks.

Compte tenu des caractéristiques de l'exosquelette (assistance des membres supérieurs), il a été décidé d'analyser l'activité musculaire pour :

- Les muscles élévateurs du bras (deltoïde antérieur, biceps brachial et grand pectoral),
- Le muscle érecteur du rachis (longissimus),
- Les muscles antagonistes (triceps brachial et grand dorsal).

Les muscles ont été rasés et nettoyés avec du matériel biomédical afin d'éliminer les sédiments et la couche de peau morte, minimisant ainsi l'influence d'éventuelles variations d'impédance

sous les électrodes. Les capteurs ont été placés suivant les recommandations du SENIAM, c'est-à-dire longitudinalement et le long des fibres du muscle [17]. La Figure 5 montre le placement des capteurs EMG.

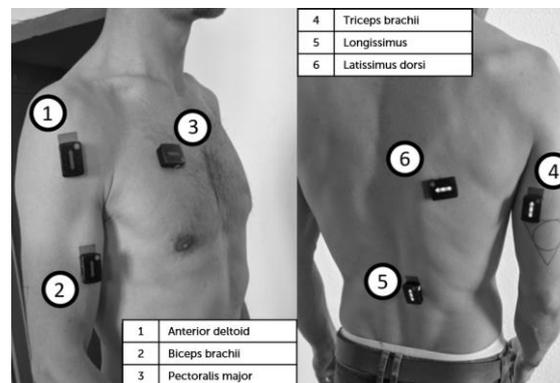


Figure 5 : placement des capteurs EMG

Le traitement des données a été effectué avec un script personnalisé sous MATLAB (The MathWorks Inc. Natick, MA, USA) en trois étapes. D'abord, les données brutes ont été rectifiées et filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas de 4 Hz (filtre Butterworth de 3^{ème} ordre). Ensuite, les valeurs RMS (Root Mean Square) ont été calculées pour toutes les données (mesures CVM et celles des 3 tâches). Enfin, les mesures EMG des 3 tâches ont été normalisées vis-à-vis des valeurs RMS maximales des CVM.

Plateforme de force

Des études précédentes ont montré que l'équilibre postural pouvait être évalué à partir de la valeur de la vitesse du centre de pression (COPv) [19][20][21]. Pour ce faire, une plateforme de force AMTI® AGC-O a été utilisée pour les tâches 1 et 2 (tâches immobiles). Les forces et les moments de réaction du sol ont été enregistrés à une fréquence de 150 Hz pour les directions x, y et z, puis filtrés en passe-bas à 5 Hz. Enfin, les valeurs moyennes du COPv ont été calculées pour les deux tâches, avec et sans exosquelettes.

Questionnaire subjectif

Deux types de critères subjectifs ont été considérés au cours des expérimentations : la perception de l'effort (pour les membres supérieurs et pour la zone dorso-lombaire), et le confort global. Une échelle de Borg CR10 est couramment utilisée dans la littérature pour évaluer la perception de l'activité musculaire en raison de la relation entre l'effort (F) et la mesure CR10 ($F = CR10 \times 10$). En ce qui concerne le confort, les participants ont dû évaluer

leur perception sur une échelle comprise entre 0 (très inconfortable) et 10 (très confortable).

Les deux critères ont été évalués pour les 3 tâches et les 2 conditions, à l'exception de la note de confort global qui n'a pas été considérée pour la tâche 1 (non pertinent en raison de la nature statique de la tâche).

Traitement et analyse des données

Les données objectives et subjectives ont été analysées à l'aide du logiciel libre JASP (Université d'Amsterdam, les Pays-Bas), avec un seuil de significativité fixé à $p < 0,05$. Etant donné la taille de la population ($n = 12$ participants), il n'était pas possible d'utiliser le test de Student (hypothèse de normalité du test non respectée). En conséquence, le test non-paramétrique de Wilcoxon a été utilisé pour l'analyse statistique.

RESULTATS

Tâche 1 : tâche statique

L'activité musculaire de trois muscles était statistiquement plus faible ($p < 0,05$) pour la condition « avec exosquelette » : le deltoïde antérieur, le biceps brachial et le grand pectoral. Les résultats présentés sur la Figure 6 montrent une diminution de près de 12%, 26% et 18% respectivement pour chacun de ces muscles.

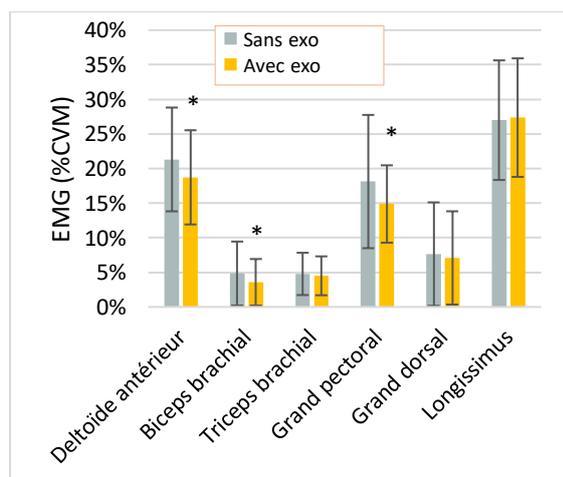


Figure 6 : valeurs EMG moyennes normalisées par la CVM, avec et sans exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

Les résultats du COPv ont uniquement été analysés pour 8 participants en raison de problèmes techniques survenus au cours de l'acquisition. Les valeurs moyennes pour les deux conditions (sans et avec exosquelette) étaient respectivement $M_{\text{sans_exo}} = 0.0091 \text{ m.s}^{-1}$ et $M_{\text{avec_exo}} = 0.0086 \text{ m.s}^{-1}$ mais ces résultats ne sont pas statistiquement différents.

Les résultats en termes d'effort perçu sont présentés sur la Figure 7. L'analyse statistique a permis de montrer que l'utilisation d'un exosquelette aide à réduire la perception de l'effort des membres supérieurs ($p < 0,05$) d'un score de 3,96/10 (entre « modéré » et « dur ») à un score de 2,42/10 (entre « faible » et « modéré »). Aucune différence statistique n'a été constatée pour la perception d'effort de la zone dorso-lombaire.

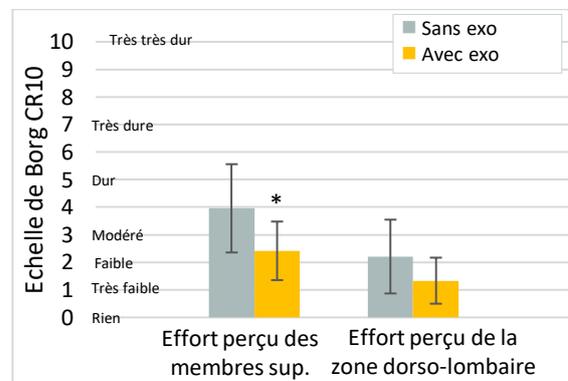


Figure 7 : résultats subjectifs pour la tâche 1 : efforts perçus sans et avec exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

Tâche 2 : tâche de manipulation manuelle

Suite à un problème technique, seuls 11 des 12 participants ont pu réaliser cette tâche. En ce qui concerne les résultats de l'activité musculaire, quatre mesures EMG étaient statistiquement plus faibles ($p < 0,05$) pour la condition « avec exosquelette » (Figure 8). L'activité du deltoïde antérieur et du biceps brachial étaient respectivement 16% et 33% plus faible avec le Hapo ms. Pour ce qui est du grand pectoral et du grand dorsal, les valeurs EMG étaient 7% et 12% plus faibles comparées à la condition de référence.

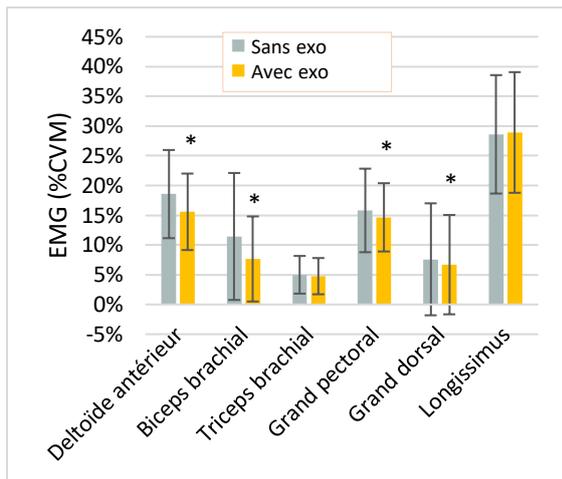


Figure 8 : valeurs EMG moyennes normalisées par la CVM, avec et sans exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

L'analyse statistique du COPv n'a pas montré de différence significative entre les participants, qu'ils utilisent ou non l'exosquelette. Pour chacun des cas, les moyennes étaient de $M_{\text{sans_exo}} = 0.1212 \text{ m.s}^{-1}$ and $M_{\text{avec_exo}} = 0.1204 \text{ m.s}^{-1}$.

Les résultats subjectifs sont présentés sur la Figure 9. L'effort perçu au niveau des membres supérieurs et au niveau de la zone dorso-lombaire était statistiquement plus faible avec l'exosquelette ($p < 0,05$). Les notes moyennes d'effort perçu étaient 27% et 36% plus faibles avec l'exosquelette comparées à la condition de référence. Le critère de confort perçu n'était pas statistiquement différent entre les deux conditions ($p > 0,05$).

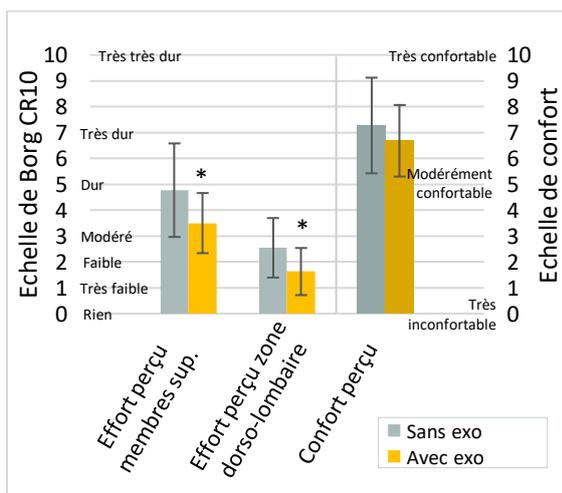


Figure 9 : résultats subjectifs pour la tâche 2 : efforts perçus et confort perçu sans et avec exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

Tâche 3 : transport de charge

La troisième tâche a montré une différence statistique entre les deux conditions seulement pour les muscles des bras ($p < 0,05$). La Figure 10 présente une réduction de l'activité musculaire de 18%, 19% et 7%, respectivement pour le deltoïde antérieur, le biceps brachial et le triceps brachial.

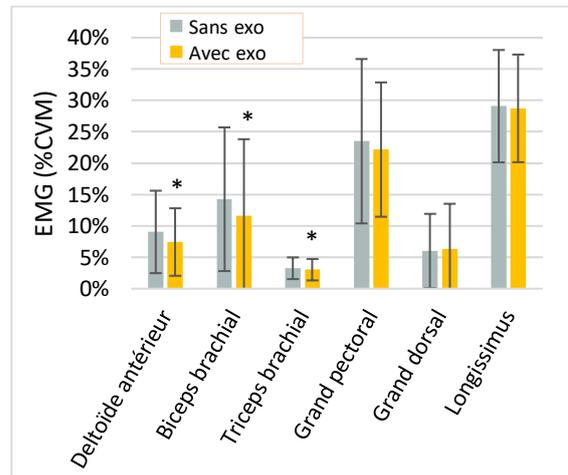


Figure 10 : valeurs EMG moyennes normalisées par la CVM, avec et sans exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

Les résultats de perception d'effort et de confort sont présentés sur la Figure 11. Les mesures subjectives étaient statistiquement plus faibles lorsque les participants portaient le Hapo ms ($p < 0,05$). Les valeurs moyennes du CR10 ont diminuées de 3,25/10 à 2,58/10 (réduction de 21%) pour la perception d'effort des membres supérieurs et de 2,83/10 à 1,88/10 (réduction de 34%) pour la perception d'effort de la zone dorsale. Par ailleurs, les participants ont estimé un confort réduit de 15% lorsqu'ils réalisaient la tâche de transport avec l'exosquelette.

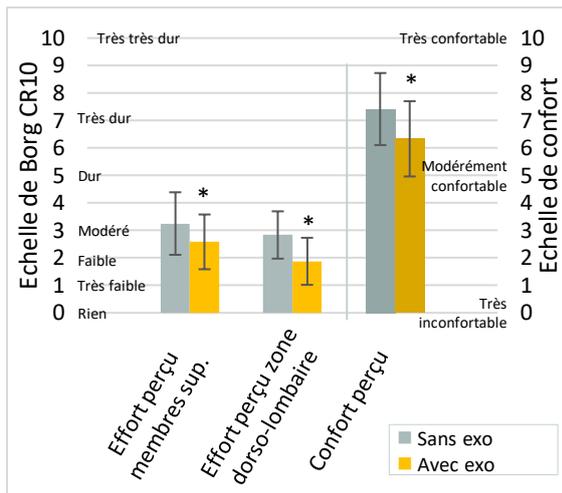


Figure 11 : résultats subjectifs pour la tâche 3 : efforts perçus et confort perçu sans et avec exosquelette. Les astérisques indiquent une différence significative ($p < 0.05$) vis-à-vis de la condition de référence (sans exosquelette)

DISCUSSION

L'objectif de cette étude consistait à évaluer un exosquelette passif développé pour apporter une assistance physique des membres supérieurs pour des travaux à mi-hauteur.

Influence de l'activité musculaire

Les résultats de la présente étude ont montré une réduction significative des muscles élévateurs du bras (deltoïde antérieur et biceps brachial) lorsque les tâches étaient effectuées avec l'exosquelette. En ce qui concerne le deltoïde, l'amélioration entre les deux conditions était de 12% (de 21,3 à 18,7 %CVM), 16% (de 18,6 à 15,6 %CVM) et 18% (de 9,0 à 7,4 %CVM), respectivement pour les tâches 1, 2 et 3. En ce qui concerne le biceps, l'activité musculaire était abaissée de 26 % pour la tâche statique avec les bras au-dessus de la tête, de 33 % pour la tâche de manipulation manuelle et de 19 % pour la tâche de port de charge.

Des tendances similaires ont déjà été observées dans des études précédentes [22][23][24][25], mais les valeurs de l'activité musculaire de l'épaule pouvaient varier d'une étude à l'autre, en fonction notamment de la tâche réalisée, de la masse de l'outil [26] ou du modèle d'exosquelette utilisé [27].

De plus, le port de l'exosquelette a permis de réduire l'activité musculaire du grand pectoral de 18% pour la tâche 1 et de 7% pour la tâche 2. Quant

à la tâche 3, aucune réduction significative n'a été observée (~22%CVM dans les deux cas). Cela peut probablement être expliqué par le fait que le capteur EMG était placé sur la partie haute du muscle (faisceau claviculaire) qui est principalement activé lors de la flexion du bras vers l'avant.

En dehors de la tâche 1 qui était statique, les tâches 2 et 3 (dynamiques) engendraient successivement une sollicitation des muscles agonistes (deltoïde antérieur et biceps brachial) et antagonistes (triceps brachial et grand dorsal). Dans une étude de 2018 [25], Theurel *et al.* ont montré une sollicitation beaucoup plus importante des muscles antagonistes (triceps brachial notamment) lors des tâches de soulèvement (+95%) et d'empilement (+116%) avec l'exosquelette. Les auteurs ont précisé que cette sur-sollicitation pouvait être liée à l'utilisation de ressorts dans l'exosquelette : l'énergie accumulée lors de l'extension du bras (compression du ressort) est ensuite délivrée lors de la remontée du bras (extension de l'épaule). Sachant que la technologie Hapo ms est également basée sur le principe de stockage de l'énergie dans un ressort (accumulation et délivrance de l'énergie), une tendance similaire était attendue. Les résultats de la présente étude montrent l'inverse : il n'y a pas de différence significative pour les tâches 1 et 2 ; pour la tâche 3, il a été constaté une réduction de la sollicitation du triceps de -7%. Une explication possible est donnée par la spécificité de la tâche 3 où le triceps est suspenseur du bras, il travaille en synergie avec d'autres muscles, en particulier lorsque les participants doivent prendre et déposer la charge. Quant au muscle du grand dorsal, le seul résultat significatif a été observé lors de la tâche de manipulation manuelle. L'activité musculaire mesurée ici était inférieure de 12% lors du port de l'exosquelette, ce qui est en accord avec l'étude de Huysamen [22].

Influence de l'équilibre postural

L'équilibre postural est un paramètre clé pouvant être affecté par l'utilisation d'un dispositif tel qu'un exosquelette. Une étude de Kim *et al.* [24] a montré que l'utilisation d'un modèle d'exosquelette pour membres supérieurs avait augmenté la vitesse de déplacement du centre de pression d'environ 12% dans la direction antérieur-postérieur. En ce qui concerne le Hapo ms, la présente étude n'a pas relevé de différence statistique en termes d'équilibre postural pour la tâche statique et celle de manutention manuelle. La différence de

résultats entre ces deux études peut être expliquée par la masse des exosquelettes : le Hapo ms ne pèse que 1,3 kg alors que celui utilisé dans l'étude de Kim *et al.* était de 6,5 kg.

Perception subjective

Pour chacune des tâches, les résultats ont montré une diminution des mesures subjectives lorsque les participants portaient l'exosquelette. Si les mesures objectives et subjectives des membres supérieurs allaient bien dans le même sens (activité musculaire réduite pour le deltoïde antérieur, le biceps brachial et le grand pectoral), il n'en est pas de même pour la zone dorso-lombaire. Ceci est particulièrement vrai pour la tâche 3 où les participants ont rapporté une amélioration subjective de 34% pour les muscles du dos alors que les mesures EMG n'étaient pas statistiquement différentes entre les deux conditions. Trois hypothèses peuvent expliquer cette différence. D'abord, le port de l'exosquelette pourrait avoir un effet contextuel sur la perception des participants (effet placebo). Ensuite, le Hapo ms pourrait avoir amélioré la perception globale, impliquant alors une meilleure note subjective pour la zone dorso-lombaire. Enfin, bien que ce soit peu probable, l'exosquelette pourrait en effet avoir assisté des muscles du dos autres que le longissimus et le grand dorsal. En ce qui concerne le critère de confort, une différence significative a été observée uniquement pour la tâche 3. Par conséquent, il semblerait que le Hapo ms ne réduise le confort que lorsque les participants sont amenés à se déplacer avec l'exosquelette (pas d'impact lorsque ceux-ci sont immobiles).

LIMITES

Trois limites principales peuvent être notées. Premièrement, tous les participants étaient en bonne santé et relativement jeunes (âge moyen de 30.3 ± 9.9 ans), ce qui n'est pas représentatif de la population active. Deuxièmement, bien que 12 sujets aient participé à l'étude, l'échantillon de la population reste tout de même limité pour l'analyse statistique. Ceci est particulièrement vrai pour les résultats de l'équilibre postural comprenant uniquement les mesures de 8 participants (dû à des problèmes techniques). Troisièmement, les participants de l'étude étaient des salariés du groupe Ergosanté, ce qui pourrait avoir une légère influence sur les résultats subjectifs (les mesures

objectives ne sont pas affectées). Cette limite a toutefois été contrôlée en choisissant des participants parmi une filiale du groupe qui n'est pas impliquée dans le processus de développement des exosquelettes.

PERSPECTIVES

Cette évaluation menée en laboratoire s'est focalisée sur le Hapo ms de 4 kg d'assistance. Une autre campagne est prévue pour évaluer également la version du Hapo ms avec des ressorts plus raides (assistance jusqu'à 6 kg). Ces essais seront réalisés en suivant le même protocole que celui décrit dans cette publication scientifique. L'objectif final vise à avoir une évaluation complète du Hapo ms, quel que soit son niveau d'assistance (4 ou 6 kg).

CONCLUSION

L'exosquelette évalué dans cette étude réduit significativement l'activité musculaire du deltoïde antérieur et du biceps brachial qui sont les deux muscles principalement sollicités lors de l'utilisation du Hapo ms. Pour le muscle de l'épaule (deltoïde antérieur), il a été observé une réduction de la sollicitation 12%, 16% et 18%, respectivement pour les tâches 1, 2 et 3, alors que l'amélioration était de 26%, 33% et 19% pour le muscle du bras (biceps brachial). Aucune différence n'a été relevée au niveau des muscles antagonistes et des muscles du dos. Les résultats de l'étude ont également montré que le port de l'exosquelette ne venait pas perturber l'équilibre postural des participants. Enfin, les critères subjectifs ont montré une bonne appréciation du Hapo ms pour toutes les tâches, et ce bien que le critère de confort ait légèrement été réduit. Pour conclure, cette évaluation scientifique a permis de montrer que le Hapo ms semble bien adapté pour apporter une assistance physique lors de tâches à mi-hauteur.

REFERENCES

- [1] Straker, L. M. (1999). An overview of manual handling injury statistics in western

- Australia. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24(4), 357-364.
- [2] Cole, M. H., & Grimshaw, P. N. (2003). Low back pain and lifting: a review of epidemiology and aetiology. *Work*, 21(2), 173-184.
- [3] Bureau of Labor Statistics. (2013). Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2012. Bureau of Labor Statistics, US Department of Labor, Washington, DC.
- [4] Eurofound. (2017). Sixth European Working Conditions Survey – Overview report (2017 update), Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- [5] INRS. (2011). Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS). Guide pour les préventeurs. ED 957.
- [6] Yang, C. J., Zhang, J. F., Chen, Y., Dong, Y. M., & Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222(8), 1599-1612.
- [7] Viteckova, S., Kutilek, P., & Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: A review. *Biocybernetics and biomedical engineering*, 33(2), 96-105.
- [8] Bogue, R. (2009). Exoskeletons and robotic prosthetics: a review of recent developments. *Industrial Robot: an international journal*.
- [9] Yan, T., Cempini, M., Oddo, C. M., & Vitiello, N. (2015). Review of assistive strategies in powered lower-limb orthoses and exoskeletons. *Robotics and Autonomous Systems*, 64, 120-136.
- [10] De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671-681.
- [11] Huysamen, K., de Looze, M., Bosch, T., Ortiz, J., Toxiri, S., & O'Sullivan, L. W. (2018). Assessment of an active industrial exoskeleton to aid dynamic lifting and lowering manual handling tasks. *Applied ergonomics*, 68, 125-131.
- [12] Madinei, S., Alemi, M. M., Kim, S., Srinivasan, D., & Nussbaum, M. A. (2020). Biomechanical evaluation of passive back-support exoskeletons in a precision manual assembly task: "Expected" effects on trunk muscle activity, perceived exertion, and task performance. *Human factors*, 62(3), 441-457.
- [13] Jelti, Z., Lebel, K., Bastide, S., Le Borgne, P., Slangen, P., & Vignais, N. (2021). Effect of using a physical assistance device for movements involving trunk bending.
- [14] Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational exoskeletons: overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 264-280.
- [15] Theurel, J., Atain-Kouadio, J.-J., Kerangueven, L. (2021). Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail.
- [16] INRS. (2021). Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel. ED 6416.
- [17] Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *Journal of electromyography and Kinesiology*, 10(5), 361-374.
- [18] Burden, A. (2010). How should we normalize electromyograms obtained from healthy participants? What we have learned from over 25 years of research. *Journal of electromyography and kinesiology*, 20(6), 1023-1035.
- [19] Maki, B. E., Holliday, P. J., & Topper, A. K. (1994). A prospective study of postural balance and risk of falling in an ambulatory and independent elderly population. *Journal of gerontology*, 49(2), M72-M84.
- [20] Prieto, T. E., Myklebust, J. B., Hoffmann, R. G., Lovett, E. G., & Myklebust, B. M. (1996). Measures of postural steadiness: differences between healthy young and elderly adults. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 43(9), 956-966.
- [21] Ruhe, A., Fejer, R., & Walker, B. (2011). Center of pressure excursion as a measure of balance performance in patients with non-specific low back pain compared to healthy controls: a systematic review of the literature. *European Spine Journal*, 20(3), 358-368.
- [22] Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K. S., Graf, E., & O'Sullivan, L. W. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied ergonomics*, 70, 148-155.
- [23] Kim, S., Nussbaum, M. A., Esfahani, M. I. M., Alemi, M. M., Alabdulkarim, S., & Rashedi, E.

(2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I—"Expected" effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied ergonomics*, 70, 315-322.

[24] Kim, S., Nussbaum, M. A., Esfahani, M. I. M., Alemi, M. M., Jia, B., & Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II—"Unexpected" effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied ergonomics*, 70, 323-330.

[25] Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T., & Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied ergonomics*, 67, 211-217.

[26] Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M. A., & Agnew, M. J. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57(12), 1864-1874.

[27] Alabdulkarim, S., & Nussbaum, M. A. (2019). Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Applied ergonomics*, 74, 55-66.