



**HAL**  
open science

# Etude exploratoire du processus de familiarisation à l'usage d'exosquelettes assistant le dos : caractérisation des déterminants moteurs et biomécaniques

Clément Thevenot

## ► To cite this version:

Clément Thevenot. Etude exploratoire du processus de familiarisation à l'usage d'exosquelettes assistant le dos : caractérisation des déterminants moteurs et biomécaniques. Sciences de l'Homme et Société. 2021. hal-03615022

**HAL Id: hal-03615022**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03615022>**

Submitted on 21 Mar 2022

**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.

Master « Sciences et Techniques  
des Activités Physiques et Sportives :  
Ingénierie et Ergonomie de l'Activité  
Physique »

Parcours-type : **Métrieologie, Performance, Santé**

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du grade de master

**Etude exploratoire du processus de  
familiarisation à l'usage d'exosquelettes assistant  
le dos :  
Caractérisation des déterminants moteurs et  
biomécaniques**

présenté par

**Clément Thevenot**

**Maître de stage :** Kévin Desbrosses, PhD, Institut National de Recherche et de Sécurité, Vandœuvre-lès-Nancy.

**Guidant universitaire :** Guillaume Mornieux, PhD – HDR, UFR STAPS, Université de Lorraine.

Juin 2021



<b>I. INTRODUCTION</b> .....	1
<b>1.1. Contexte d'intervention</b> .....	1
<b>1.2. Cadre théorique</b> .....	1
1.2.1. Travail et troubles musculosquelettiques .....	1
1.2.2. Exosquelettes, une technologie d'assistance physique.....	2
1.2.3. Bénéfices associés à l'utilisation d'exosquelettes assistant le dos.....	3
1.2.4. Autres conséquences associées à l'utilisation d'exosquelettes assistant le dos ...	5
1.2.5. Entraînement à l'usage d'exosquelettes professionnels .....	6
1.2.6. Familiarisation à l'usage d'exosquelettes professionnels .....	8
1.2.7. Apprentissages moteurs : définition et marqueurs .....	9
1.2.8. Objectifs de l'étude .....	12
<b>II. MATERIELS ET METHODES</b> .....	13
<b>2.1. Participants</b> .....	13
<b>2.2. Exosquelettes</b> .....	13
2.2.1. Cray X <sup>TM</sup> .....	13
2.2.2. Exoback <sup>TM</sup> .....	14
2.2.3. Back X <sup>TM</sup> .....	15
<b>2.3. Protocole expérimental</b> .....	15
2.3.1. Contenu des séances d'entraînement.....	15
2.3.2. Description des tâches évaluatives .....	18
<b>2.4. Recueil et traitement des données</b> .....	20
2.4.1. Performance .....	20
2.4.2. Cinématique .....	21
<b>2.5. Analyse et statistiques</b> .....	23
<b>III. RESULTATS</b> .....	25
<b>3.1. Performance</b> .....	25
<b>3.2. Amplitudes articulaires</b> .....	26
<b>3.3. Fluidité du mouvement</b> .....	30
<b>IV. DISCUSSION</b> .....	33
<b>4.1. Apprentissages moteurs</b> .....	34
<b>4.2. Processus de familiarisation</b> .....	35
<b>4.3. Facteurs pouvant impacter ce processus</b> .....	37
<b>4.4. Limitations et perspectives</b> .....	37
<b>V. CONCLUSION</b> .....	39

## **LISTE DES ABREVIATIONS**

CNAM : Caisse Nationale de l'Assurance Maladie.

DAP : dispositifs d'assistance physique.

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité.

MI : membres inférieurs.

MS : membres supérieurs.

PLAD : Personal Lift Assistive Device.

RAP : robots d'assistance physique.

TMS : troubles musculosquelettiques.

## TABLE D'ILLUSTRATIONS (FIGURES)

FIGURE 1 : SCHEMATISATION D'UN DAP (A) ET D'UN RAP (B) ASSISTANT LE DOS. ....	3
FIGURE 2 : EVOLUTION DE LA PERFORMANCE LORS DE LA REPETITION D'UNE TACHE DE POURSUITE (NEWELL ET AL. (2001), ADAPTEE D'ADAMS, 1952).....	10
FIGURE 3 : CRAY X™ (GERMAN BIONIC SYSTEM).....	14
FIGURE 4 : EXOBACK™ (RB3D).....	14
FIGURE 5 : BACK X™ (US BIONICS, INC.).....	15
FIGURE 6 : DESIGN EXPERIMENTAL .....	16
FIGURE 7 : ILLUSTRATION DES TACHES MAN-S ET MAN-S LIBRE.....	19
FIGURE 8 : ILLUSTRATION DE LA TACHE PRECISION. ....	20
FIGURE 9 : PLACEMENT DES CAPTEURS. ....	21
FIGURE 10 : SCHEMATISATION DES ANGLES ARTICULAIRES.....	22
FIGURE 11 : TEMPS DE REALISATION DES 3 CYCLES INTERMEDIAIRES - MAN-S LIBRE .....	25
FIGURE 12 : PERFORMANCE (ERREURS*0,6 + TEMPS*0,4) – PRECISION.....	26
FIGURE 13 : AMPLITUDES ARTICULAIRES - MAN-S. ....	27
FIGURE 14 : AMPLITUDES ARTICULAIRES – PRECISION. ....	29
FIGURE 15 : FLUIDITE DU MOUVEMENT - MAN-S. ....	31
FIGURE 16 : FLUIDITE DU MOUVEMENT – PRECISION.....	32
FIGURE 17 : ILLUSTRATION DU PARCOURS. ....	48

## **REMERCIEMENTS**

Je souhaite avant tout remercier l'équipe de recherche de l'INRS (Dr. Jean THEUREL, Dr. Chris HAYOT, Laurent CLAUDON, Mathilde SCHWARTZ, Olivier REMY) pour leur contribution lors des différentes présentations orales et de la rédaction de ce mémoire, et en particulier, le Dr. Kévin DESBROSSES, pour sa disponibilité et ses judicieux conseils qui ont grandement alimenté ma réflexion et qui m'ont permis de rédiger ce travail.

J'adresse également ma reconnaissance au Dr. Isabelle URMES pour son implication et ses conseils dans le traitement statistique des données et dans la rédaction de la partie « **2.5. Analyse et statistiques** ».

Enfin, je tiens à témoigner ma gratitude au Dr. Guillaume MORNIEUX pour sa disponibilité et ses conseils qui ont également contribué à alimenter ma réflexion.

# **I. INTRODUCTION**

## **1.1. Contexte d'intervention**

Lors de ce stage, je suis intervenu dans le cadre d'une étude de laboratoire menée par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles). Cette étude visait à évaluer les conséquences physiologiques de l'utilisation d'exosquelettes d'assistance du dos lors de tâches simulées de manutention manuelle. Préalablement à l'évaluation, les participants ont été entraînés à l'utilisation des différents exosquelettes testés et aux différentes tâches proposées dans le protocole afin de les familiariser à ces conditions expérimentales. Mon intervention au sein de l'équipe de recherche s'est positionnée au niveau de cette phase de familiarisation, avec pour objectif d'y analyser son processus. Mon rôle était donc de recruter les participants, de planifier leurs venues au laboratoire, de gérer le recueil de données lors des séances d'entraînement, d'en assurer leur traitement et leur exploitation, ainsi que d'assister l'équipe de recherche lors de la journée expérimentale. Si le protocole d'entraînement a été mis en place préalablement à mon intervention, le choix des variables dépendantes à analyser pour étudier le processus de familiarisation, sujet de ce mémoire de fin d'études, ont été de mon initiative.

## **1.2. Cadre théorique**

### **1.2.1. Travail et troubles musculosquelettiques**

Les TMS sont des « maladies qui touchent les articulations, les muscles, les tendons et les nerfs, c'est-à-dire l'appareil locomoteur, comme par exemple, les épicondylites, les lombalgies ou encore les tendinopathies » (Atain Kouadio, & Zana, 2011). Ils sont la première cause de maladie professionnelle reconnue. En effet, selon le rapport de gestion de la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie de 2020 (CNAM, 2020), 88% des maladies professionnelles reconnues sont liées à des TMS. Ceux-ci ne sont évidemment pas sans conséquences pour les entreprises. Selon la CNAM, le coût annuel des TMS en 2020, selon les secteurs d'activités, varie de 29 millions d'euros pour le secteur de la propreté, à 186 millions d'euros pour le secteur du bâtiment (CNAM, 2021). De ce fait, la prévention des TMS représente des enjeux économiques et de santé au travail importants en France.

Parmi ces TMS, les lombalgies représentent 20% des accidents du travail, 7% de la totalité des maladies professionnelles reconnues en France et représentent un coût de près d'un milliard d'euros par an pour l'assurance maladie, soit l'équivalent du coût annuel des autres TMS

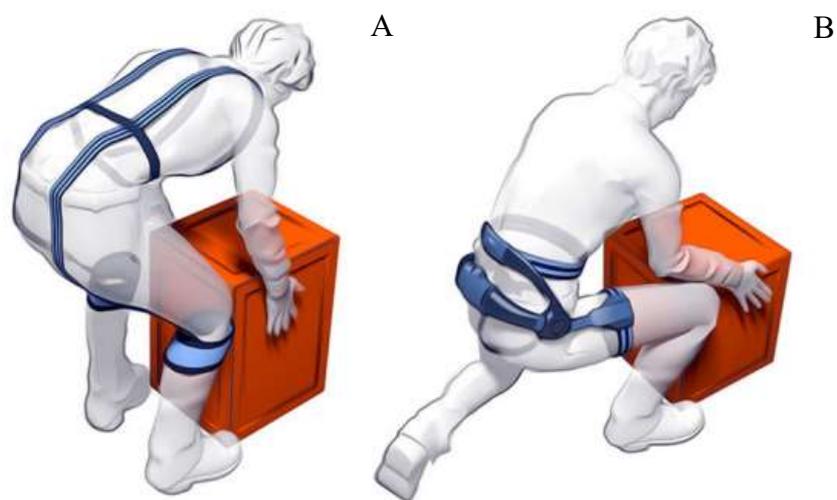
(CNAM, 2016). La lombalgie, définie comme une « douleur lombo-sacrée à hauteur des crêtes iliaques ou plus bas, médiane ou latéralisée, avec possibilité d'irradiation ne dépassant pas le genou, mais avec une prédominance des douleurs lombo-sacrées » (ANAES, 2000), entraîne donc à elle-seule un énorme fardeau économique (Kent, & Keating, 2005 ; Steenstra, Verbeek, Heymans, & Bongers, 2005 ; Thelin, A., Holmberg, & Thelin, N., 2008). De plus, elle est un problème de santé extrêmement courant (Andersson, 1997 ; Deyo, Cherkin, Conrad, & Volinn, 1991 ; Dionne, Dunn, & Croft, 2006) et est la principale cause de limitation des activités et des absences au travail (Lidgren, 2003). Selon l'INRS, les lombalgies ont généralement une origine multifactorielle. Les facteurs de risques professionnels sont importants mais les prédispositions personnelles, des pathologies intercurrentes, des risques pris lors des activités domestiques et de loisirs ou encore des risques psychosociaux de la vie hors travail peuvent s'y ajouter. Les principaux facteurs de risques d'origine professionnelle sont les manutentions manuelles, les chutes, les expositions aux vibrations corps entier, les postures pénibles sous contrainte mais aussi le travail physique dur (INRS, 2021).

Dans une perspective de réduire les facteurs de risques professionnels cités ci-dessus, nous assistons depuis quelques années à l'émergence, dans les entreprises, de nouvelles technologies d'assistance physique telles que les exosquelettes. Ceux-ci ont fait naître l'espoir d'une solution hybride, où l'exposition des travailleurs aux contraintes physiques pourrait être limitée (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016), alors que la valeur ajoutée de l'être humain en termes de savoir-faire, de flexibilité et d'analyse serait préservée. Si l'industrie (agro-alimentaire, métallurgie, automobile...) apparaît comme l'exemple précurseur de cette tendance, la grande majorité des secteurs professionnels sont aujourd'hui tentés par l'acquisition d'exosquelettes. Au-delà de la prévention des TMS, l'espoir placé dans ces technologies est de préserver la santé des salariés, de réduire l'absentéisme, le turn-over ou encore d'aider le retour au travail de personnes présentant des restrictions d'aptitudes (Theurel, & Claudon, 2018).

### 1.2.2. Exosquelettes, une technologie d'assistance physique

Ces technologies se caractérisent par une structure vêtue par l'utilisateur, assistant certains mouvements en produisant des forces et/ou moments de forces visant à soulager les articulations et donc réduire les efforts musculaires de l'utilisateur (De Looze et al., 2016). Les exosquelettes sont généralement catégorisés selon les régions corporelles qu'ils assistent, ou

encore, en fonction de l'articulation pour laquelle ils sont dédiés (par exemple, exosquelettes d'assistance du dos, exosquelettes d'assistance des membres supérieurs...). Ils sont aussi distingués selon la source d'énergie utilisée pour fournir l'assistance à l'utilisateur (De Looze et al., 2016). En effet, l'assistance physique produite par ces nouvelles technologies peut être générée par un système de restitution d'énergie mécanique (ressorts, bandes élastiques, ...), mais aussi par un système robotisé (couple commande-moteur) (Theurel, & Claudon, 2018). Dans le premier cas, nous parlons alors de dispositifs d'assistance physique (DAP) et dans le second, de robots d'assistance physique (RAP) (Theurel, & Claudon, 2018) (*Figure 1*).



*Figure 1 : Schématisation d'un DAP (A) et d'un RAP (B) assistant le dos.*

Deledda INRS (2021) [Image en ligne]. Repérée à : <https://www.inrs.fr/risques/exosquelettes/ce-qu-il-faut-retenir.html>

Actuellement, il apparaît que les exosquelettes assistant le dos font partie des dispositifs les plus répandus en entreprise avec pour objectif de lutter efficacement contre le risque de lombalgies (Theurel, & Claudon, 2018). Ce sont ces dispositifs d'assistance du dos qui ont fait l'objet de la recherche menée par l'INRS dans laquelle j'ai été impliqué.

### 1.2.3. Bénéfices associés à l'utilisation d'exosquelettes assistant le dos

Les exosquelettes d'assistance du dos semblent globalement bénéfiques pour les utilisateurs lors d'activités de levage dynamique ou de maintien statique (De Looze et al., 2016 ; Kermavnar, de Vries, de Looze, & O'Sullivan, 2021). Néanmoins, les bénéfices apportés

apparaissent extrêmement variables d'une étude à l'autre, en particulier en termes de réduction des efforts musculaires du dos lors de l'utilisation de DAP (Theurel & Desbrosses, 2019). A titre d'exemple, les réductions de l'activité musculaire des érecteurs spinaux étaient de 10 à 44% lors de tâches de manutention manuelle (Frost, Abdoli-E, & Stevenson, 2009) et de 10% (Ulrey, & Fathallah, 2013) à 57% (Koopman, Kingma, Faber, de Looze, & van Dieën, 2019) lors de maintien statique (flexion du tronc dans le plan sagittal). Une étude réalisée dans des conditions de travail réelles a également montré des réductions significatives de l'activité neuromusculaire des érecteurs spinaux de 20 à 25% lors de l'utilisation de l'exosquelette pendant une tâche d'assemblage nécessitant une flexion du tronc et un maintien statique (Graham, Agnew, & Stevenson, 2009). Selon Theurel et Desbrosses (2019), trois sources de variabilité semblent être particulièrement importantes pour expliquer ces différences. - Premièrement, les bénéfices obtenus par les exosquelettes assistant la région du dos semblent dépendre de la posture adoptée (i.e. l'inclinaison du tronc au cours de la tâche expérimentale). - Deuxièmement, la masse de la charge manutentionnée peut également affecter les effets relatifs à leur utilisation. – Finalement, les caractéristiques mécaniques des dispositifs semblent être la troisième source importante de variabilité en termes de réduction de l'amplitude des activités neuromusculaires (Theurel & Desbrosses, 2019 ; Schwartz, Theurel, & Desbrosses, 2021).

A noter que, dans leur revue de littérature, Kermavnar et al. (2021) montrent que les réductions de l'activité des érecteurs spinaux lors de tâches dynamiques de levage semblent être variables à la fois lors de l'utilisation de DAP (-6 à -35%) et de RAP (-6 à -48%). Les sources de variabilités avancées par Theurel et Desbrosses (2019) pourraient également expliquer les différences observées entre les études ayant investigué l'effet de l'usage de RAP d'assistance du dos. Toutefois, contrairement aux DAP, les RAP peuvent être capables de générer des couples d'assistance plus importants (Theurel & Desbrosses, 2019) et pourraient permettre un réglage adapté à la charge manutentionnée ou à la plage angulaire de mobilisation. Malgré cette variabilité, probablement induite par des protocoles expérimentaux différents, la littérature scientifique récente s'accorde sur l'efficacité des exosquelettes assistant le dos pour réduire la sollicitation musculaire au niveau lombaire lors de manutentions impliquant la flexion/extension du tronc dans le plan sagittal (Theurel & Desbrosses, 2019 ; Kermavnar et al., 2021).

#### 1.2.4. Autres conséquences associées à l'utilisation d'exosquelettes assistant le dos

Bien que ces nouvelles technologies paraissent efficaces dans la réduction des activités neuromusculaires au niveau de la région lombaire, il apparaît que l'utilisation d'un exosquelette assistant le dos (DAP et RAP confondus) pourrait engendrer des modifications motrices, et notamment cinématiques (Theurel & Desbrosses, 2019). Ulrey et Fathallah (2013) ont par exemple montré une diminution de la courbure thoracique et lombaire du rachis lors de l'utilisation d'un DAP pour effectuer une tâche de manutention réalisée en technique « stoop » (Ulrey, & Fathallah, 2013). Le stoop est une technique impliquant la flexion du rachis, caractérisée par un angle de flexion des genoux supérieur à  $135^{\circ}$  et un angle de flexion du tronc à environ  $90^{\circ}$  (Van Dieën, Hoozemans, & Toussaint, 1999 ; St-Vincent, Tellier, & Lortie, 1989). Des modifications cinématiques significatives de la chaîne posturale ont également été observées. Par exemple, une augmentation significative de la flexion plantaire lors d'une tâche de maintien statique (flexion du tronc de  $30^{\circ}$  dans le plan sagittal) (Abdoli-Eramaki, Agnew, & Stevenson, 2006) ainsi qu'une hyper-extension significative de l'articulation du genou pendant une tâche d'assemblage (Bosch, van Eck, Knitel, & de Looze, 2016) ont été mises en évidence lors de l'utilisation d'exosquelettes d'assistance du dos. Sadler et al. (2011) ont aussi observé que l'utilisation du Personal Lift Assistive Device (PLAD) induisait des modifications dans la cinématique de levage d'une charge. Les flexions thoracique et lombaire du rachis étaient réduites tandis que la flexion de hanche et la dorsiflexion de cheville étaient significativement supérieures lors de l'utilisation du PLAD (Sadler, Graham, & Stevenson, 2011). Enfin, des travaux plus récents ont montré une diminution des angles de flexion de la hanche et du genou lors de l'utilisation d'un DAP au cours d'une tâche de manutention réalisée en technique « stoop » (Simon, Alemi, & Asbeck, 2021).

Au-delà des nouveaux risques potentiels pour le système musculosquelettique que peuvent représenter ces modifications cinématiques, leurs effets sont également à considérer comme des limites possibles à une utilisation pérenne en entreprise. En effet, ils pourraient constituer un frein à la volonté d'acquérir de tels dispositifs, lié notamment à l'acceptation des utilisateurs du fait d'une perte possible de leurs repères habituels et de leurs performances au travail, même transitoire. Cependant, l'origine de ces modifications cinématiques reste floue, même si celles-ci pourraient être la conséquence d'une nécessaire réorganisation du contrôle moteur lors de la réalisation de tâches motrices avec exosquelette.

Les observations faites quant aux conséquences cinématiques de l'usage d'exosquelettes pourraient être dépendantes de la cinématique du mouvement opéré avec l'exosquelette, et

s'avérées propres aux caractéristiques individuelles des utilisateurs. Par exemple, l'effet du genre sur la coordination motrice lors de tâches de levage de charges (Pan, Firouzabadi, Zander & Schmidt, 2020) semble être à l'origine d'effets liés à l'utilisation d'un exosquelette, différenciés entre les hommes et les femmes (Alemi, Madinei, Kim, Srinivasan, & Nussbaum, 2020 ; So, et al., 2020). Le niveau d'expertise motrice à la réalisation de la tâche évaluée et à l'usage de l'exosquelette étudié a, quant à lui, également été suspecté d'avoir une influence sur les résultats des études antérieures (Favenec, 2020). En revanche, à ce jour, très peu d'informations sont disponibles à notre connaissance quant aux effets du niveau d'entraînement des utilisateurs à l'usage des exosquelettes sur les réponses motrices et biomécaniques induites par l'usage de ces dispositifs.

#### 1.2.5. Entraînement à l'usage d'exosquelettes professionnels

Malgré le nombre grandissant d'études sur les exosquelettes, très peu de données sont disponibles quant à une durée d'entraînement à la tâche et à l'utilisation de l'exosquelette avant l'évaluation du dispositif, et ce, notamment pour les exosquelettes d'assistance du dos (*Tableau 1*). Or, les apprentissages moteurs liés à la période d'entraînement à l'usage d'exosquelettes pourraient constituer une phase essentielle de leur intégration en entreprise (Atain Kouadio, Kerangueven, & Turpin-Legendre, 2018) mais aussi, s'avérer indispensables en amont de toute évaluation de leurs effets physiologiques et biomécaniques.

A notre connaissance, quatre revues de littérature ont fait l'état des effets de l'usage de différents DAP et RAP sur différentes variables physiologiques et biomécaniques, i.e. l'activité neuromusculaire ou encore la cinématique (De Looze, Bosch, Krause, Stadler, & O'Sullivan, 2016 ; Kermavnar et al., 2021 ; McFarland, & Fischer, 2019 ; Theurel, & Desbrosses, 2019). Sur les 84 articles recensés par ces revues, seulement 11 indiquent une durée d'entraînement à la réalisation de la tâche et/ou à l'usage de l'exosquelette étudié. Trois autres études non recensées dans ces revues (Gagnon, Escalona, Vermette, Carvalho, Karelis, Duclos, & Aubertin-Leheudre, 2018 ; Jin, Cui, & Agrawal, 2015 ; Koopman, Näf, Baltrusch, Kingma, Rodriguez-Guerrero, Babič, ..., & van Dieën, 2020) ont également mis en place une phase d'entraînement dans leurs protocoles expérimentaux (*Tableau 1*). Si ce recensement concerne toutes les catégories d'exosquelettes, il est nécessaire de relever que seulement 6 études relatives à des exosquelette d'assistance du dos ont mentionné une durée d'entraînement à l'usage d'exosquelettes au préalable des expérimentations. A noter que ces précédentes études

ne définissent pas clairement l'objectif attendu par l'entraînement. La notion de « familiarisation » est régulièrement citée comme l'objectif de cette phase d'entraînement, mais sa définition apparaît variable entre les différents travaux (Favennec, 2020).

*Tableau 1 : Etudes mentionnant une durée d'entraînement avec l'exosquelette (MS : membres supérieurs ; MI : membres inférieurs).*

<b>Références</b>	<b>Type d'exosquelette</b>	<b>Durée d'entraînement</b>
Abdoli-E, Agnew, & Stevenson (2006)	DAP DOS	Quelques essais avant l'expérimentation.
Alemi, Madinei, Kim, Srinivasan, & Nussbaum (2020)	DAP DOS	Une séance de 120 minutes avec 2 exosquelettes.
Baltrusch, S., van Dieen, J., van Bennekom, C., & Houdijk, H. (2020)	DAP DOS	Quelques minutes avant l'expérimentation.
Koopman, Näf, Baltrusch, Kingma, Rodriguez-Guerrero, Babič, ..., & van Dieën (2020)	DAP DOS	Dix minutes avant l'expérimentation.
Kozinc, Ž., Baltrusch, S., Houdijk, H., & Šarabon, N. (2020)	DAP DOS	Cinq minutes avant l'expérimentation.
Schwartz, Theurel, & Desbrosses (2021)	DAP DOS	Trois séances de 20 minutes par exosquelette.
Gillette, & Stephenson (2019)	DAP MS	Utilisation de l'exosquelette sur le lieu de travail durant quelques jours consécutifs avant l'expérimentation.
Kim, & Nussbaum (2019)	DAP MS	40 minutes, deux jours avant l'expérimentation.
Moyon, Poirson, & Petiot (2019)	DAP MS	15 minutes avant l'expérimentation.
Smets (2019)	DAP MS	Trois mois consécutifs d'utilisation régulière avant l'expérimentation.
Theurel, Desbrosses, Roux, & Savescu (2018)	DAP MS	Quatre séances de 97 minutes chacune.

Van Engelhoven, Poon, Kazerooni, Rempel, Barr, & Harris-Adamson (2019)	DAP MS	Cinq à dix minutes avant l'expérimentation.
Luger, Cobb, Seibt, Rieger, & Steinhilber, (2019)	DAP MI	Une séance de 30 minutes.
Gagnon, Escalona, Vermette, Carvalho, Karelis, Duclos, & Aubertin-Leheudre (2018)	RAP MI	Deux séances de 45 à 60 minutes chacune.
Jin, Cui, & Agrawal (2015)	RAP MI	Quatre minutes avant l'expérimentation.

### 1.2.6. Familiarisation à l'usage d'exosquelettes professionnels

Si certains auteurs évoquent la familiarisation comme une découverte du système, sans informations précises relatives, ni à la durée, ni au contenu de cette phase préalable aux mesures expérimentales (Bosch et al., 2016 ; De Vries, Murphy, Könemann, Kingma, & de Looze, 2019 ; Sadler et al., 2011), d'autres auteurs la définissent comme une période d'entraînement pour s'« habituer » à utiliser l'exosquelette au cours de la tâche expérimentale (Kim, Nussbaum, Mokhlespour Esfahani, Alemi, Alabdulkarim, et al., 2018 ; Theurel et al., 2018).

D'un point de vue appliqué, la familiarisation correspondrait à la découverte progressive de l'usage de l'exosquelette (Atain Kouadio et al., 2018). Comme il est souligné dans ce dernier article, une phase d'apprentissage progressive, facilitée par la reproduction de la tâche en situation réelle de travail, fait partie intégrante de l'évaluation de l'interaction individu-exosquelette. Cette phase serait nécessaire pour que l'opérateur s'assure que l'exosquelette est bien adapté à la tâche et à son environnement. Il s'agirait donc de « lui donner les moyens de construire ses premiers repères (réglages éventuels du système, ressenti de l'opérateur, modification gestuelle...) au regard de son interaction avec l'exosquelette » (Atain Kouadio et al., 2018).

Cette séquence viserait à satisfaire trois points. Premièrement, s'assurer que les spécifications techniques et les possibilités de réglages du système s'adaptent à la morphologie de l'opérateur. Deuxièmement, identifier les moments durant lesquels les phases d'assistance physique du dispositif sont actives ou non. Enfin, elle viserait à percevoir les apports et les contraintes induites par l'exosquelette. Il semblerait là aussi évident, qu'une période d'entraînement à l'usage de l'exosquelette soit nécessaire pour permettre la survenue des premiers apprentissages moteurs liés à son utilisation.

Quelle qu'en soit la définition apportée, il semble sous-entendu dans les études précédentes que la familiarisation est considérée comme un premier stade post-apprentissage, impliquant une stabilisation de la réorganisation motrice, indispensable à l'évaluation des effets des exosquelettes. Sans avoir eu recours à cette étape préliminaire, il est compréhensible que l'interprétation de toutes mesures expérimentales visant à évaluer les bénéfices et les limites de l'usage d'un exosquelette pourrait être remise en question. En effet, évaluer directement un exosquelette sans passer par ce stade de familiarisation pourrait revenir à n'évaluer que les effets transitoires de ce dispositif et non les effets qu'il pourrait induire une fois la phase d'apprentissage effectuée. Certains auteurs (Goršič, Song, Dai, & Novak, 2021) ont en effet observé, sans toutefois l'évaluer, que le temps d'adaptation à un exosquelette pouvait être variable selon l'individu, et que les paramètres biomécaniques pouvaient ainsi potentiellement être affectés. De ce fait, il apparaît nécessaire d'impliquer les participants dans une phase d'entraînement à la réalisation de la tâche et à l'usage de l'exosquelette avant de réaliser les mesures expérimentales. Au terme de cette période d'entraînement, les apprentissages moteurs mis en place pourraient conduire à des réponses physiologiques et biomécaniques différentes de celles évaluées lors de précédentes études n'ayant pas intégré cette notion de familiarisation.

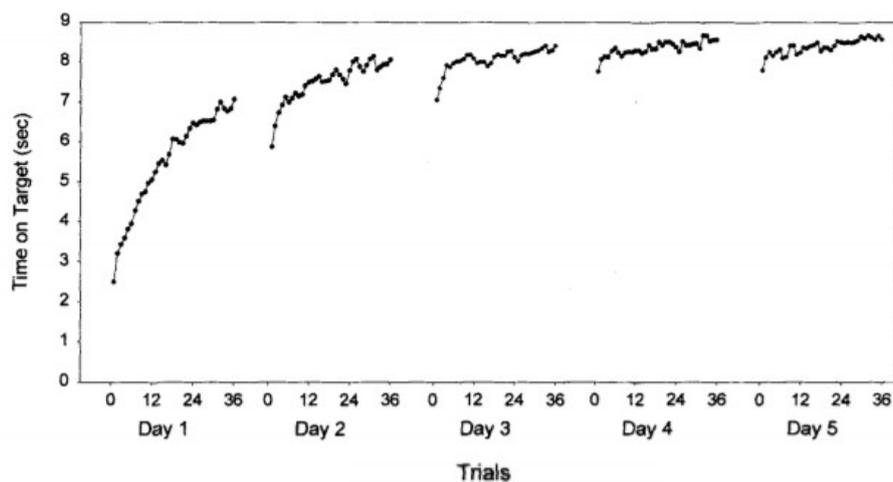
Par conséquent, nous définirons au cours de ce travail, le stade de familiarisation à l'usage d'exosquelettes par l'observation d'une stabilisation après évolution, d'au moins un marqueur pouvant être défini comme un des témoins d'une réorganisation motrice. Aussi, pour justifier la mise en place d'un protocole de familiarisation et s'assurer de l'atteinte de ce stade, des critères objectifs permettant d'évaluer les apprentissages moteurs au cours de la période d'entraînement doivent alors être identifiés.

#### 1.2.7. Apprentissages moteurs : définition et marqueurs

Adams (1971) définit l'apprentissage moteur comme une augmentation de la performance absolue dans la réalisation d'une tâche motrice au cours d'une période d'entraînement à cette même tâche. Il semble communément admis par les auteurs traitant de l'apprentissage moteur, que la répétition d'un mouvement entraîne une amélioration de la performance lors de son exécution suivante (Karni, Meyer, Rey-Hipolito, Jezzard, Adams, Turner, & Ungerleider, 1998 ; Lee, Swanson, & Hall, 1991). Par exemple, il a été mis en évidence une réduction du temps de mouvement lors de la réalisation d'une tâche motrice ou du nombre d'erreurs effectuées lors de la réalisation d'une tâche de pointage manuel au cours d'un processus

d'apprentissage (Park, Kim, Winstein, Gordon, & Schweighofer, 2016 ; Van Abswoude, Santos-Vieira, van der Kamp, & Steenbergen, 2015).

Concernant l'évolution des performances motrices, les travaux de Lee (2019) ont montré que l'apprentissage, caractérisé ici par un temps de mouvement lors d'une tâche de pointage informatique, suivait des phases de régression et de progression lors de l'entraînement à la réalisation d'une tâche motrice étalée sur plusieurs séances (Lee, 2019). Cependant, au fur et à mesure des séances d'entraînement, l'amélioration de la performance était de moins en moins importante, jusqu'à obtenir un plateau, caractérisant un potentiel stade de familiarisation. Ceci confirme la cinétique d'évolution des performances d'apprentissage (*Figure 2*), dans une tâche différente de celle étudiée dans les travaux d'Adams (1952), dans laquelle les participants devaient conserver le curseur d'une souris informatique le plus longtemps dans un cercle rouge en trajectoire circulaire (Pursuit Rotor Task) (Adams, 1952).



*Figure 2 : Evolution de la performance lors de la répétition d'une tâche de poursuite (Newell et al. (2001), adaptée d'Adams, 1952).*

Plus spécifiquement, un travail antérieur mené par l'INRS, s'intéressant au processus de familiarisation aux exosquelettes a également montré une évolution du temps de mouvement lors d'une tâche de dextérité manuelle entre les deuxième et troisième séances d'entraînement à l'utilisation d'un DAP assistant le dos (Schwartz, 2018). Si trois séances ont semblé suffisantes pour atteindre une stabilisation du temps de mouvement, il est à relever que cette étude s'est focalisée uniquement sur des DAP, présentant des niveaux d'assistance plus faibles et des masses réduites par rapport à des RAP. Il est ainsi possible que pour ces systèmes

« contraignant » davantage l'utilisateur par rapport à ses référentiels habituels (i.e., masse et niveau d'assistance plus importants), un temps d'apprentissage plus conséquent soit nécessaire.

Ces travaux suggèrent ainsi le profil d'évolution potentiel des performances de travail à attendre lors de la découverte d'une nouvelle tâche avec l'usage d'un exosquelette.

Néanmoins, pour tenter de caractériser plus finement ces apprentissages moteurs, il paraît intéressant d'étudier également d'autres descripteurs, liés par exemple à l'organisation cinématique ou neuromusculaire du mouvement. Certains travaux spécifiques aux exosquelettes professionnels se sont par exemple intéressés à l'évaluation de la fluidité du mouvement des participants (Fong, Crocher, Oetomo, & Tan, 2015 ; Georgarakis, Song, Wolf, Riener, & Xiloyannis, 2020 ; Little, Antuvan, Xiloyannis, De Noronha, Kim, Masia, & Accoto, 2019). La fluidité du mouvement est définie comme une qualité liée à la continuité ou à la non-intermittence d'un mouvement (i.e., accélérations/décélérations alternées), indépendamment de son amplitude ou de sa durée (Balasubramanian, Melendez-Calderon, Roby-Brami, & Burdet, 2015). Dans ces études, les auteurs ont mis en exergue que la fluidité du mouvement avait été modifiée par l'utilisation de l'exosquelette. Ils n'ont toutefois pas évalué cette fluidité du mouvement au cours d'un processus d'apprentissage. A notre connaissance, il n'existe donc pas de preuves concrètes montrant une quelconque évolution des réponses cinématiques, posturales ou encore neuromusculaires à l'usage d'exosquelettes justifiant la mise en place d'un protocole d'entraînement préalablement à l'évaluation de leurs effets. A fortiori, il n'existe pas non plus de preuves montrant une phase de stabilisation dans les potentielles évolutions de ces réponses qui pourrait correspondre à un stade de familiarisation à l'usage d'exosquelettes.

En revanche, dans un contexte plus large, plusieurs travaux, qui se sont également intéressés à la notion de fluidité du mouvement ont confirmé que les mesures quantitatives de cet indice sont à considérer comme un indicateur robuste dans l'évaluation des apprentissages moteurs (Sejnowski, 1998 ; Balasubramanian et al., 2015). Or, au regard des travaux précédents sur les apprentissages moteurs, il n'est pas à exclure que les conséquences évaluées de l'usage d'exosquelettes puissent reposer, en partie, sur un phénomène transitoire lié aux apprentissages moteurs. Les études antérieures ont en effet investigué les effets transitoires des exosquelettes, sans nous permettre de déterminer si des modifications auraient pu potentiellement se manifester à l'issue d'une période plus longue d'utilisation. Il semble donc nécessaire, pour mieux comprendre le processus d'adaptation aux exosquelettes, d'investiguer l'évolution de différentes variables (performance, cinématique, fluidité du mouvement) au cours de plusieurs

séances d'entraînement successives, afin de vérifier leur pertinence comme témoins des apprentissages moteurs occasionnés par l'usage d'exosquelettes.

#### 1.2.8. Objectifs de l'étude

Sur la base des travaux existants, ce travail a évalué le processus de familiarisation à l'usage d'exosquelettes professionnels par l'intermédiaire de différents marqueurs d'apprentissage moteur décrits préalablement (la performance de travail et la fluidité du mouvement) mais aussi par rapport à des variables cinématiques (amplitudes articulaires) pouvant être affectées par l'utilisation de ces nouvelles technologies.

L'objectif principal de ce travail visait à déterminer si l'entraînement à l'usage d'exosquelettes professionnels assistant le dos permettait d'observer une évolution des variables retenues, comme témoins d'un apprentissage moteur. Sur la base des travaux antérieurs ayant montré une évolution, au cours de trois séances d'entraînement à l'utilisation d'un DAP assistant le dos, du temps de mouvement lors d'une tâche de dextérité manuelle (Schwartz, 2018), nous avons émis l'hypothèse que les paramètres analysés au cours des cinq séances d'entraînement (performance, amplitude articulaire et fluidité du mouvement) pouvaient évoluer de manière significative.

Le deuxième objectif était de déterminer si les participants pouvaient atteindre un stade de familiarisation au cours des cinq séances d'entraînement et de définir parmi les critères explorés, ceux considérés comme pertinents quant à l'évaluation de la familiarisation à l'usage d'exosquelettes, en marquant une stabilisation significative dans leur évolution. Nous avons émis l'hypothèse qu'au cours des différentes séances d'entraînement, le marqueur d'apprentissage moteur le plus global évalué lors des tâches d'apprentissage (la performance) pouvait atteindre un état stable dans son évolution.

Enfin, le dernier objectif de ce travail était de déterminer si la familiarisation à l'usage d'exosquelettes était dépendante de facteurs tels que le type de tâche ou encore les caractéristiques de l'exosquelette (RAP versus DAP). Les effets transitoires (sans phase d'apprentissage) liés à l'utilisation d'exosquelettes semblent en effet dépendants du type de tâche comme des caractéristiques du système. Nous avons donc émis l'hypothèse que l'atteinte du stade de familiarisation pouvait également être dépendante du type de tâche effectuée et des caractéristiques de l'exosquelette utilisé.

## **II. MATRIELS ET METHODES**

### **2.1. Participants**

Sept hommes ( $22,6 \pm 0,9$  ans,  $181,6 \pm 2,6$  cm,  $74,9 \pm 5,8$  kg) et sept femmes ( $21,4 \pm 1,3$  ans,  $163,3 \pm 4,0$  cm,  $58,1 \pm 6,1$  kg) se sont portés volontaires pour participer à cette étude. Aucune expérience professionnelle dans le champ de la manutention manuelle n'a été exigée pour le recrutement des volontaires. En revanche, les participants ne devaient présenter aucun antécédent médical, articulaire ou périarticulaire, d'origine traumatique ou lié à une atteinte chronique, ayant affecté les épaules, le rachis (e.g., lombalgies) ou les membres inférieurs au cours des six mois précédant l'expérimentation. D'autres critères de non-inclusion (fumeur quotidien, femme enceinte, traitement au long cours, pathologie évolutive, ...) ont également été évalués par le médecin en charge de l'inclusion des participants. Compte tenu de l'utilisation d'exosquelettes, l'ajustement et le réglage de ceux-ci exigeaient que la taille des participants soit strictement comprise entre 1,55 m et 1,85 m et que leur indice de masse corporelle n'excède pas  $28 \text{ kg/m}^2$ . Les participants ont été informés de toutes les procédures expérimentales et des éventuels risques liés à celles-ci. A la suite de la remise de ces informations, les volontaires ont déclaré par écrit leur consentement éclairé pour participer à cette étude. Cette expérimentation a reçu un accord favorable du Comité de Protection des Personnes Est III (IDRCB : 2019-A02901-56).

### **2.2. Exosquelettes**

Deux RAP (Cray X<sup>TM</sup>, Exoback<sup>TM</sup>) et un DAP (Back X<sup>TM</sup>) d'assistance du dos ont été étudiés et sont décrits ci-dessous. Ils ont été conçus pour apporter une assistance à l'effort des muscles du dos lors de mouvements de redressement du tronc ou du maintien de celui-ci en position fléchi vers l'avant. Ces exosquelettes ont été retenus pour les mesures expérimentales car ils figurent parmi les principaux dispositifs commercialisés en France. Tout au long du protocole expérimental, les exosquelettes ont été ajustés aux opérateurs selon les recommandations des fabricants.

#### **2.2.1. Cray X<sup>TM</sup>**

Ce modèle est développé et commercialisé par la société German Bionic Systems (Allemagne). Cet appareil mono-articulé est constitué de deux segments, prenant appui au niveau du thorax,

des hanches, du bas du dos et des cuisses de l'utilisateur (*Figure 3*). Ces segments sont mis en mouvement par des moteurs électriques et un servomoteur Harmonic Drive<sup>®</sup>, délivrant un couple de force contrôlé (allant jusqu'à 120 N.m) dans l'axe transversal de l'articulation de la hanche, entre les points d'appuis antérieurs (thorax et cuisse), lors de la flexion/extension sagittale du tronc. La masse totale de l'appareil est d'environ 11 kg. Cette masse est principalement répartie de part et d'autre des hanches.



*Figure 3 : Cray X<sup>TM</sup> (German Bionic System).*

#### 2.2.2. Exoback<sup>TM</sup>

Ce modèle est développé et commercialisé par la société RB3D (France). Cet appareil biarticulé est constitué de trois segments, prenant appui au niveau des épaules, des cuisses et des fesses de l'utilisateur (*Figure 4*).



*Figure 4 : Exoback<sup>TM</sup> (RB3D).*

Ceux-ci sont mis en mouvement par des actionneurs électriques à câbles, délivrant un couple de force contrôlé (allant jusqu'à 72 N.m) dans l'axe transversal de l'articulation de la hanche et du bas du dos, entre les points d'appuis antérieurs (épaules et cuisses), lors de la

flexion/extension sagittale du tronc. La masse totale de l'appareil est de 8,4 kg et répartie essentiellement dans le bas du dos.

### 2.2.3. Back X<sup>TM</sup>

Ce DAP biarticulé est développé et commercialisé par la société US Bionics, Inc. (États-Unis). Il est composé de deux parties, un harnais souple et un cadre rigide (*Figure 5*). Le cadre se fixe sur le harnais au niveau de l'articulation de la hanche de l'utilisateur délivrant un couple de force contrôlé dans l'axe transversal de l'articulation de la hanche par l'intermédiaire de deux points d'appui au niveau du thorax et des cuisses. Ce dispositif possède deux niveaux d'assistance (données constructeurs en N.m non-disponibles). Sa masse totale est de 3,2 kg et répartie sur l'ensemble du système.



*Figure 5 : Back X<sup>TM</sup> (US Bionics, Inc.).*

## 2.3. Protocole expérimental

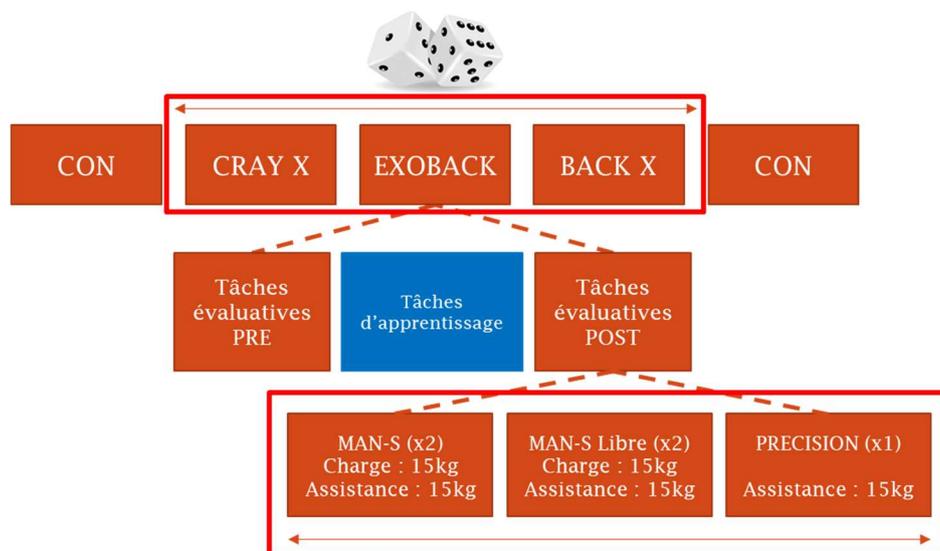
Les volontaires de cette étude ont participé à cinq séances d'entraînement d'environ deux heures chacune. La durée imposée entre chaque séance d'entraînement était comprise entre 3 et 7 jours. Cette planification permettait notamment une période de récupération suffisante entre chaque séance.

### 2.3.1. Contenu des séances d'entraînement

Les cinq séances étaient structurées selon le même design expérimental (*Figure 6*). A chaque séance, les participants suivaient un entraînement pour chaque exosquelette (Cray X<sup>TM</sup>,

Exoback™, Back X™). L'ordre de présentation des exosquelettes était randomisé. Pour chaque exosquelette, les participants ont réalisé des tâches évaluatives en début de séance (« PRE »), puis des tâches d'apprentissage et enfin des tâches évaluatives en fin de séance (« POST »). Les tâches évaluatives « PRE » et « POST » consistaient à réaliser les tâches MAN-S, MAN-S Libre et PRECISION décrites ci-dessous (2.3.2. *Description des tâches évaluatives*).

L'ordre de réalisation des tâches évaluatives était aussi randomisé. A noter qu'en début et fin de chaque séance, les participants réalisaient également les tâches évaluatives en condition de référence (CON), sans exosquelette. Dans le cadre de l'objectif principal de cette étude, nous nous sommes uniquement focalisés sur les données recueillies lors des tâches évaluatives « POST » (à l'issue des séances d'entraînement) effectuées avec chaque exosquelette (encadrés rouges, *Figure 6*).



*Figure 6 : Design expérimental*

Le contenu des tâches d'apprentissage était spécifique à chaque séance (*Tableau 2*). Ainsi, selon la séance, les participants devaient réaliser les tâches MAN-S, MAN-R, FLE Chevilles, FLE Genoux et/ou Parcours selon différentes modalités. L'ensemble des tâches d'apprentissage est décrit en *Annexe*.

Tableau 2 : Tâches d'apprentissage des différentes séances.

<b>Séance 1</b>		
<b>Tâches</b>	<b>Réglages</b>	<b>Consignes</b>
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
MAN-S 10kg		5 cycles/charge (x2)
<b>Séance 2</b>		
<b>Tâches</b>	<b>Modalités</b>	<b>Consignes</b>
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
FLE Chevilles 5kg – 15kg		10s/charge (x2)
FLE Genoux 5kg – 15kg		10s/charge (x2)
Parcours	Avec les 2 niveaux d'assistance	1 fois/assistance
<b>Séance 3</b>		
<b>Tâches</b>	<b>Réglages</b>	<b>Consignes</b>
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance non-adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
<b>Séance 4</b>		
<b>Tâches</b>	<b>Réglages</b>	<b>Consignes</b>
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
FLE Chevilles 5kg – 15kg		10s/charge (x2)
FLE Genoux 5kg – 15kg		10s/charge (x2)
Parcours	Avec les 2 niveaux d'assistance	1 fois/assistance
<b>Séance 5</b>		
<b>Tâches</b>	<b>Réglages</b>	<b>Consignes</b>
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)
MAN-S 5kg – 15kg	15 cycles/min Assistance non-adaptée à la charge	5 cycles/charge (x2)
MAN-R 5kg – 15kg		5 cycles/charge (x2)

Le contenu des différentes séances d'entraînement a été élaboré de sorte que les participants puissent s'entraîner à la réalisation des tâches qu'ils devaient réaliser lors de la journée d'expérimentation (MAN-S, MAN-R, FLE Chevilles, FLE Genoux), mais aussi à la réalisation d'autres tâches permettant d'enrichir leur répertoire moteur (Parcours).

### 2.3.2. Description des tâches évaluatives

Lors des cinq séances d'entraînement, les participants devaient réaliser trois tâches évaluatives impliquant la flexion/extension du tronc (MAN-S, MAN-S Libre et PRECISION). Deux d'entre elles (MAN-S et MAN-S Libre) étaient basées sur des situations de manutentions simulées en technique « stoop » et la troisième était une tâche de précision (*Figure 6*).

#### 2.3.2.1. Tâche MAN-S

Cette tâche de manutention répétitive dans le plan sagittal, identique à celle évaluée lors de la journée expérimentale, consistait pour les participants à déplacer une charge de 15 kg de 33,0 cm de longueur, 13,6 cm de largeur et 15,6 cm de hauteur depuis une plateforme positionnée à la hauteur des chevilles vers un support vertical situé à la hauteur des coudes du participant, et inversement, tout en gardant constamment une légère flexion des genoux. La cadence imposée lors de cette tâche était de 15 cycles par minute. Deux essais ont été réalisés pour cette tâche de manutention. Ces deux essais étaient séparés d'une période de récupération de 30 secondes. Un essai correspondait à la réalisation de cinq cycles. Chaque cycle consistait à l'action de soulever la charge de la plateforme située au niveau des chevilles (1) pour aller toucher le support vertical (2) avec la caisse puis la reposer sur la plateforme de départ (1) (*Figure 7*). Chacun des éléments (1) et (2) était équipé de quatre capteurs inductifs (XS112B3PAL2, Schneider Electric, France) servant à détecter les instants de contact entre la charge et les supports. Cette détection permettait de dissocier les phases de montées (extension du tronc) et de descente de la charge (flexion du tronc). Lors de cette tâche de manutention, le niveau d'assistance des exosquelettes a été réglé de façon à être adapté à la masse de la charge manutentionnée (15kg). Pour les deux RAP, le couple d'assistance a été réglé à 72 N.m. Pour le DAP, le niveau d'assistance le plus élevé a été enclenché.

#### 2.3.2.2. Tâche MAN-S Libre

Cette tâche a été mise en place dans le but de pouvoir calculer un critère de performance (le temps de mouvement) sur une tâche identique à MAN-S. Cette tâche était donc similaire en tout point à MAN-S, à l'exception de la cadence. Ici, les participants pouvaient adopter le rythme qu'ils souhaitaient au regard de la consigne qui était de s'imaginer effectuer cette tâche

à un rythme de travail pouvant être maintenu durant deux heures (pour qu'ils n'adoptent pas une cadence trop élevée mais une cadence de travail naturelle).



Figure 7 : Illustration des tâches MAN-S et MAN-S Libre.

### 2.3.2.3. Tâche PRECISION

Cette tâche, impliquant des flexions/extensions répétitives du tronc à différentes inclinaisons, et nécessitant une précision gestuelle, a été réalisée afin d'évaluer les effets de l'apprentissage dans une configuration plus complexe que celle de MAN-S (tâche standardisée permettant peu de liberté gestuelle au participant).

Cette tâche consistait ainsi pour les participants à déplacer un anneau métallique par l'intermédiaire d'une poignée le long d'une barre métallique cintrée, en forme de « vagues » (Figure 8). Les participants devaient réaliser un aller-retour sans toucher le support métallique avec l'anneau (consigne principale) et le plus rapidement possible (consigne secondaire). Un signal sonore retentissait lorsque les participants touchaient le support métallique et une erreur était comptabilisée. Il était alors demandé aux participants de ralentir leur mouvement pour éviter que la perturbation du support n'engendre pas davantage d'erreurs. Pour cette tâche, un seul essai a été réalisé dans chacune des conditions. Le niveau d'assistance des exosquelettes a été réglé identiquement à celui de MAN-S et MAN-S Libre.



Figure 8 : Illustration de la tâche PRECISION.

## 2.4. Recueil et traitement des données

Le recueil des données a été réalisé sur les trois tâches évaluatives « POST » en fin de séance. Les données recueillies ont été traitées avec le logiciel MATLAB, version 2021a (The Mathworks, Inc., Natick, MA) et différentes variables ont été calculées à partir de ces données.

### 2.4.1. Performance

Pour la tâche MAN-S Libre, le temps de mouvement (exprimé en secondes) a été retenu comme critère principal de performance. Il a été calculé au cours des trois cycles intermédiaires (cycles 2, 3 et 4).

Pour la tâche PRECISION, un critère de performance a été calculé en prenant en compte le nombre d'erreurs au cours de la tâche (lié à la consigne principale) ainsi que le temps de réalisation de celle-ci (lié à la consigne secondaire). Pour chaque participant, le nombre d'erreurs et le temps de mouvement les plus faibles se sont vus attribués la valeur de 100% (meilleure performance). A l'inverse, le nombre d'erreurs et le temps de mouvement les plus élevés se sont vus attribués la valeur de 0% (moins bonne performance). Au cours des cinq séances d'entraînement, pour chaque participant, les nombres d'erreurs et temps de mouvement recensés ont ainsi été ramenés en pourcentage en suivant l'exemple décrit ci-dessous. L'équation (1) a ensuite été appliquée pour calculer un score de performance en tenant compte de chaque nombre d'erreurs et de chaque temps de mouvement recensés et en considérant une pondération au regard de la consigne principale (60%) et de la consigne secondaire (40%).

$$\text{Performance [\%]} = \text{Erreurs [\%]} * (0,6) + \text{Temps de mouvement [\%]} * (0,4) \quad (1).$$

*Exemple : sur les cinq séances d'un participant donné, un nombre d'erreurs minimal de 0 et un nombre d'erreurs maximal de 10 correspondent respectivement à 100% et à 0%. En parallèle, le meilleur temps de mouvement (40s) et le temps de mouvement le plus élevé (140s) correspondent également respectivement à 100% et à 0%. Au cours des cinq séances d'entraînement, les nombres d'erreurs et temps de mouvement recensés ont été ramenés en pourcentage. Un nombre d'erreurs de 3 correspondra donc à 70% et un temps de mouvement de 50s correspondra à 90%. L'équation appliquée à cet exemple s'écrirait donc :*

$$\text{Performance} = 70\% * (0,6) + 90\% * (0,4) = 78\%.$$

#### 2.4.2. Cinématique

Trois types de capteurs ont été placés sur les participants (*Figure 9*). Trois centrales inertielles « custom-made » (gyroscopes et accéléromètres) étaient situées au niveau de la septième vertèbre cervicale (C7), huitième vertèbre thoracique (T8) et cinquième vertèbre lombaire (L5).

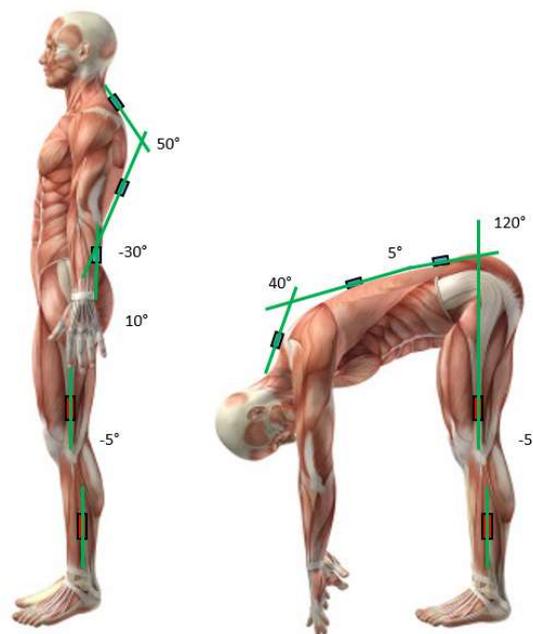
Un accéléromètre tri-axial « custom-made » était situé latéralement sur la cuisse, en suivant un axe décrit par le grand trochanter et l'épicondyle latéral fémoral.

Un accéléromètre tri-axial (Cometa srl, Milan, Italie) a été placé latéralement sur la jambe en suivant un axe décrit par l'épicondyle latéral fémoral et la malléole latérale. Les signaux ont été échantillonnés à 250 Hz et synchronisés avec toutes les autres données enregistrées.



*Figure 9 : Placement des capteurs.*

Préalablement aux calculs des angles, une correction d'offset et un filtre passe-bas Butterworth zéro-lag d'ordre 2 à 3 Hz ont été appliqués aux données provenant des centrales inertielles et des accéléromètres (Chen, Schall Jr, & Fethke, 2018). Pour les centrales inertielles, les inclinaisons de chaque capteur par rapport à la verticale gravitaire ont été calculées en fusionnant les données provenant de l'axe gyroscope (donnant la vitesse angulaire autour de l'axe médio-latéral pour les mouvements de flexion/extension du tronc) et des deux axes accéléromètres. Pour ce calcul, un filtre complémentaire a été appliqué en attribuant un coefficient de 0,99 aux données angulaires provenant du gyroscope (intégration de la vitesse angulaire) et de 0,01 aux données angulaires calculées à partir des deux accéléromètres (Chen et al., 2018). Pour ces accéléromètres, les inclinaisons de chaque capteur par rapport à la verticale gravitaire ont été calculées en appliquant des fonctions trigonométriques au quotient des données issues de l'axe antéro-postérieur par la résultante des axes vertical en antéro-postérieur. Pour les accéléromètres placés sur la cuisse et sur la jambe, les inclinaisons de chaque capteur par rapport à la verticale gravitaire ont été calculées similairement. L'inclinaison de chaque capteur a ensuite permis le calcul d'angles articulaires pour les articulations C7/T8, T8/L5, hanche et genou (*Figure 10*).



*Figure 10 : Schématisation des angles articulaires.*

A partir de ces valeurs d'angles articulaires, les variables « amplitudes articulaires » et « fluidité du mouvement » (décrites ci-dessous) ont été calculées.

Les exosquelettes évalués ont été conçus pour agir principalement lors de l'extension du tronc. Pour l'analyse des amplitudes articulaires et de la fluidité du mouvement lors de MAN-S, nous sommes donc focalisés sur les phases de montées, correspondant aux phases d'extension du tronc. Pour la tâche PRECISION, ces variables ont été calculées sur l'ensemble du mouvement.

#### 2.4.2.1. Amplitudes articulaires

Les amplitudes articulaires (exprimées en degrés) pour les articulations C7/T8, T8/L5, de la hanche et du genou ont été calculées en soustrayant la valeur minimale à la valeur maximale des angles respectifs formés par chaque articulation.

#### 2.4.2.2. Fluidité du mouvement

Les vitesses angulaires des articulations C7/T8, T8/L5, de la hanche et du genou ont été calculées en dérivant les angles articulaires respectifs formés par chaque articulation au cours du temps. La fluidité du mouvement a ensuite été évaluée à partir de la longueur d'arc spectral (SPARC) de la vitesse angulaire de chaque articulation (Balasubramanian et al., 2015). L'algorithme utilisé pour le calcul de la longueur d'arc spectral (SPARC) est accessible depuis le lien suivant :

<https://github.com/siva82kb/smoothness/blob/master/matlab/SpectralArcLength.m>

La fluidité du mouvement est exprimée en unité arbitraire. Plus la valeur de fluidité s'approche de 0, plus le mouvement de l'articulation est considéré comme fluide.

## 2.5. Analyse et statistiques

Une vérification des valeurs potentiellement aberrantes pour chaque variable étudiée a été effectuée en considérant l'intervalle  $[Q1 - 1,5 * IQR ; Q3 + 1,5 * IQR]$  (Reuschel, Barabas, Zeman, Bendfeldt, Rasclé, Deml, & Seelbach-Goebel, 2016). Cette analyse a permis de contrôler et d'éliminer les valeurs aberrantes qui auraient pu être liées à un problème expérimental.

Les premiers et derniers cycles de chaque essai n'ont pas été inclus dans l'analyse. Méthodologiquement, nous avons supposé que ces cycles étaient différents des trois cycles

intermédiaires car le premier correspondait à la « mise en mouvement » et le dernier à la fin de la tâche. Par ailleurs, le test de Shapiro-Wilk a ensuite montré que les données n'étaient pas normalement distribuées ( $p < 0,05$ ). Avant d'agrèger les données obtenues pour un même participant sur les trois cycles des deux essais (par exemple avec la moyenne), nous avons vérifié si les mesures étaient reproductibles au sein de ces six valeurs. La première étape de cette partie fut de définir ce que nous considérons comme « reproductible ». Afin de tenir compte de la variabilité des participants, nous avons vérifié si l'ensemble des mesures des deux essais (cycles 2, 3 et 4) d'un même participant appartenait à un intervalle [moyenne  $\pm \lambda$ \*moyenne]. N'ayant aucune hypothèse chiffrée, nous avons fait varier le coefficient  $\lambda$  de l'intervalle d'acceptabilité de l'hypothèse de reproductibilité de 5 à 20%. Les données n'ont finalement pas pu être considérées comme reproductibles avec ces coefficients  $\lambda$ . Les trois cycles ainsi que les deux essais ne pouvaient pas être considérés comme reproductibles et donc moyennés. Ainsi, en tenant compte du caractère apparié des données, les six mesures ont été conservées pour les analyses et ont ensuite été intégrées au modèle statistique utilisé.

Par ailleurs, ayant observé les mêmes patterns d'évolution au cours des cinq séances entre les hommes et les femmes, nous avons réalisé les différents tests sur une population de 14 participants afin d'augmenter la puissance statistique. Aussi, au regard de la distribution non-normale des données et de leur appariement du fait de la non-reproductibilité des mesures, un test de Friedman (équivalent d'une ANOVA non-paramétrique à deux facteurs (séance \* participant) sur données appariées) a été effectué en prenant la séance comme un effet fixe et le participant comme un effet aléatoire. Un test post-hoc (test des rangs signés de Wilcoxon avec correction de Benjamini-Hochberg) a été réalisé lorsque le test de Friedman présentait un effet « séance » significatif. Le seuil de significativité des tests a été fixé à 5% ( $p < 0,05$ ). Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel R via l'interface RStudio, version 4.0.4 (RStudio, Inc., Boston, MA).

En lien avec les objectifs principaux de cette étude, nous nous sommes focalisés sur les différences statistiques avec la première et la dernière séance. Les différences statistiques par rapport à la première séance nous informeraient sur une évolution du paramètre au regard de sa valeur de départ, et celles par rapport à la dernière séance nous permettraient de vérifier sa stabilisation au cours des cinq séances d'entraînement. Les résultats sont présentés en boxplots, incluant la médiane, premier et dernier quartiles, ainsi que les valeurs minimales et maximales.

### III. RESULTATS

#### 3.1. Performance

##### 3.1.1. MAN-S Libre

Quel que soit l'exosquelette utilisé, le temps de mouvement sur les trois cycles intermédiaires de la tâche MAN-S Libre n'a pas significativement évolué au cours des cinq séances d'entraînement ( $p > 0,05$ ) (Figure 11). Pour les trois exosquelettes, la médiane était comprise entre 8 et 10 secondes tout au long des cinq séances d'entraînement, ce qui est inférieur au temps imposé dans la tâche MAN-S (12s, ligne pointillée, Figure 11).

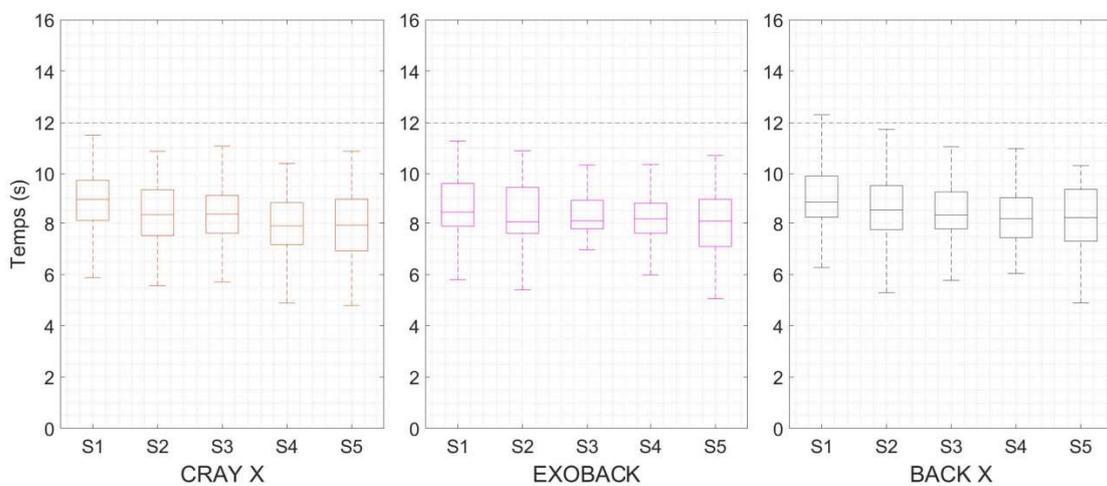


Figure 11 : Temps de réalisation des 3 cycles intermédiaires - MAN-S Libre.

Boxplots du temps de réalisation (en secondes) des trois cycles intermédiaires sur MAN-S Libre pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes (Cray X<sup>TM</sup>, Exoback<sup>TM</sup> et Back X<sup>TM</sup>). La ligne pointillée représente le temps de réalisation imposé pour ces trois cycles lors de MAN-S.

##### 3.1.2. PRECISION

Pour la tâche PRECISION, le critère de performance a été significativement amélioré pour les trois exosquelettes au cours des séances d'entraînement (Figure 12). Pour le Cray X<sup>TM</sup>, la performance réalisée lors des séances 2, 3, 4 et 5 était significativement plus élevée que celle réalisée en première séance ( $p < 0,05$ ). La performance réalisée lors de la dernière séance n'a cependant pas évolué significativement ( $p > 0,05$ ) par rapport aux séances 2, 3 et 4. Lors de l'utilisation de l'Exoback<sup>TM</sup>, au regard de la performance réalisée en première séance, celle-ci a été significativement améliorée à partir de la troisième séance ( $p < 0,05$ ). Lors de la dernière séance d'entraînement, la performance était significativement supérieure à celles réalisées en

séance 1, 2 et 3 ( $p < 0,05$ ). Concernant le Back X<sup>TM</sup>, la performance a été significativement meilleure à partir de la séance 4 par rapport à la première séance ( $p < 0,05$ ). Celle-ci n'a ensuite pas évolué au cours de la dernière séance. Seules les séances 1 et 2 étaient significativement différentes de la séance 5 ( $p < 0,05$ ).

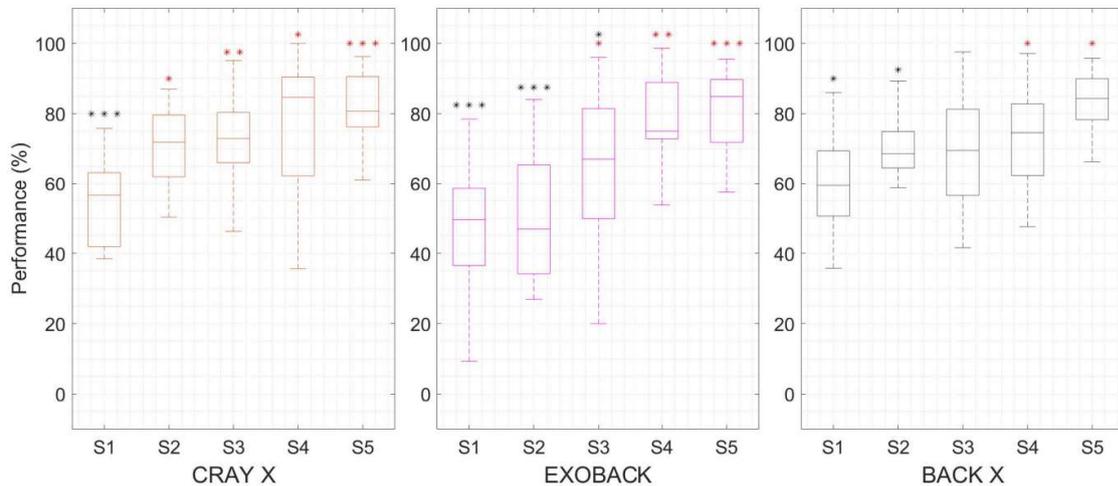


Figure 12 : Performance (Erreurs\*0,6 + Temps\*0,4) – PRECISION.

Boxplots de la performance (en %) sur PRECISION pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes (Cray X<sup>TM</sup>, Exoback<sup>TM</sup> et Back X<sup>TM</sup>). Les astérisques indiquent des résultats statistiquement significatifs : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$ . Les astérisques rouges indiquent une différence statistique par rapport à la première séance. Les astérisques noirs indiquent une différence statistique au regard de la dernière séance.

### 3.2. Amplitudes articulaires

#### 3.2.1. MAN-S

Pour la tâche MAN-S, l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension a significativement diminué ( $p < 0,01$ ) à partir de la troisième séance d'entraînement quelle que soit la modalité d'exosquelette (Figure 13). Lors de l'utilisation des deux RAP (Cray X<sup>TM</sup> et Exoback<sup>TM</sup>), cette amplitude était également significativement inférieure lors de la dernière séance d'entraînement par rapport à celles mesurées durant les séances 1 et 2 ( $p < 0,01$ ). Pour le DAP (Back X<sup>TM</sup>), l'amplitude était significativement inférieure lors de la dernière séance par rapport à celles mesurées durant les trois premières ( $p < 0,01$ ). L'amplitude articulaire de la hanche en flexion/extension n'a pas significativement évolué au cours des cinq séances d'entraînement avec le port du Cray X<sup>TM</sup> ( $p > 0,05$ ). Avec l'utilisation de l'Exoback<sup>TM</sup>, l'amplitude articulaire de la hanche mesurée pendant les séances 3 et 4 était significativement inférieure à celle mesurée en première séance mais aussi, lors de la dernière séance par rapport à celles mesurées durant les trois premières ( $p < 0,01$ ). Pour le DAP (Back X<sup>TM</sup>), l'amplitude articulaire de la

hanche en flexion/extension était significativement supérieure lors des séances 2, 3 et 4 au regard de la première et de la dernière séance.

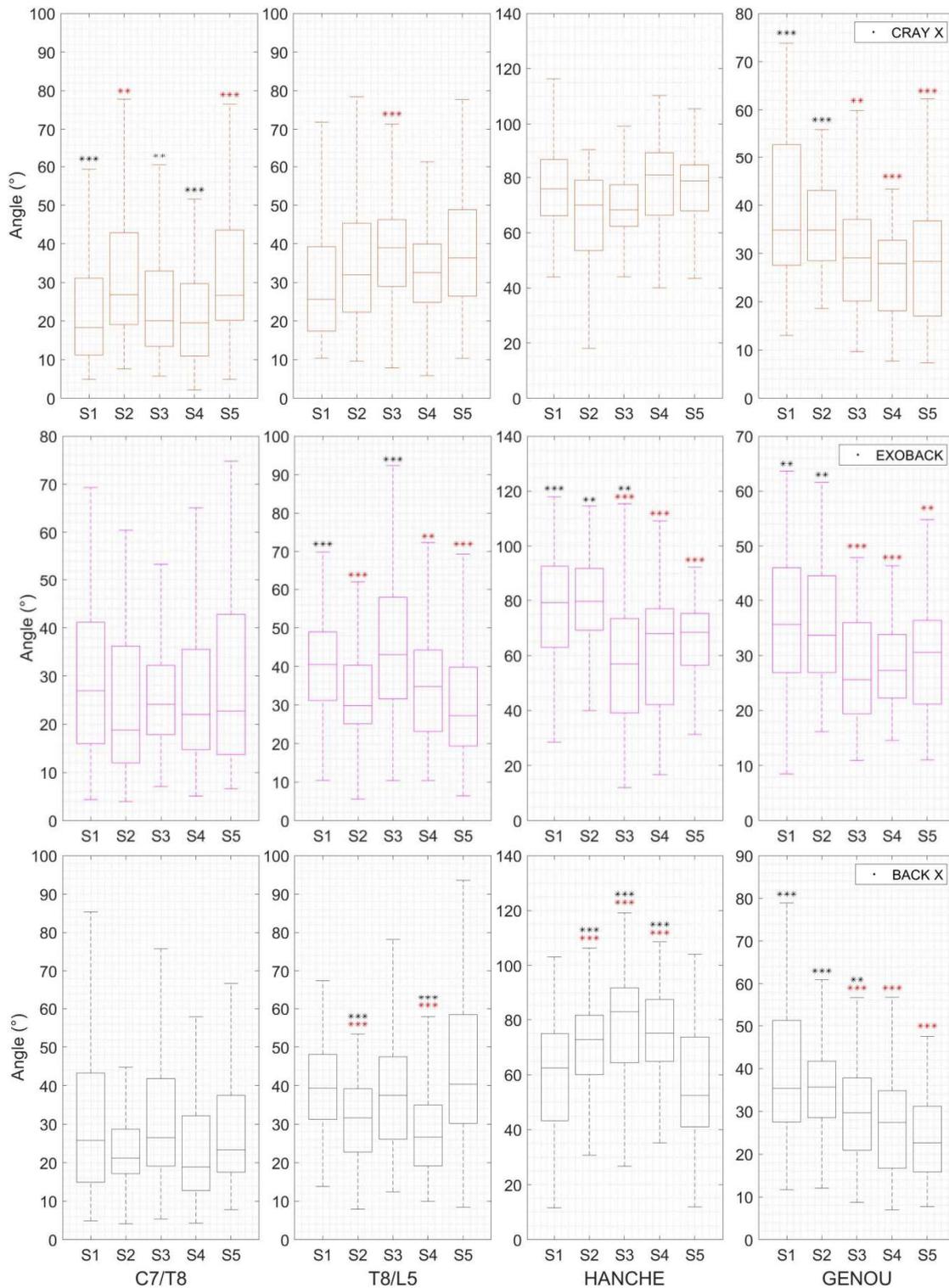


Figure 13 : Amplitudes articulaires - MAN-S.

Boxplots des amplitudes articulaires (en degrés) sur MAN-S pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes : Cray X<sup>TM</sup> (orange), Exoback<sup>TM</sup> (rose), et Back X<sup>TM</sup> (gris). Les astérisques indiquent des résultats statistiquement significatifs : \* p<0,05 ; \*\* p<0,01 ; \*\*\* p<0,001. Les astérisques rouges indiquent une différence statistique par rapport à la première séance. Les astérisques noirs indiquent une différence statistique au regard de la dernière séance.

Lors de l'utilisation du Cray X<sup>TM</sup> l'amplitude articulaire de T8/L5 en flexion/extension mesurée lors de la séance 3 était significativement supérieure à celle mesurée en première séance ( $p < 0,001$ ). Pour l'Exoback<sup>TM</sup>, cette amplitude était significativement inférieure lors des séances 2, 3 et 5 au regard de la première séance ( $p < 0,01$ ) et significativement supérieure lors de la séance 3 par rapport à celle mesurée en dernière séance ( $p < 0,001$ ). Concernant le Back X<sup>TM</sup>, cette amplitude était significativement inférieure durant les séances 2 et 4 quant à celles mesurées en première et dernière séance ( $p < 0,001$ ).

Pour l'amplitude articulaire de C7/T8 en flexion/extension, seul le Cray X<sup>TM</sup> a présenté une évolution significative au cours des séances. Au regard de la première, son utilisation a engendré une augmentation significative lors des séances 2 et 5 ( $p < 0,01$ ). Cette amplitude était significativement supérieure lors de la dernière séance comparée à celles mesurées lors des séances 1, 3 et 4 ( $p < 0,01$ ).

### 3.2.2. PRECISION

Lors de la tâche PRECISION, aucune évolution significative de l'amplitude articulaire n'a été observée au cours des cinq séances d'entraînement, quelles que soient l'articulation et la modalité exosquelette, mis à part pour l'amplitude articulaire de T8/L5 en flexion/extension lors de l'utilisation du Back X<sup>TM</sup> qui était inférieure en séance 4 au regard de la première ( $p < 0,05$ ) (*Figure 14*).

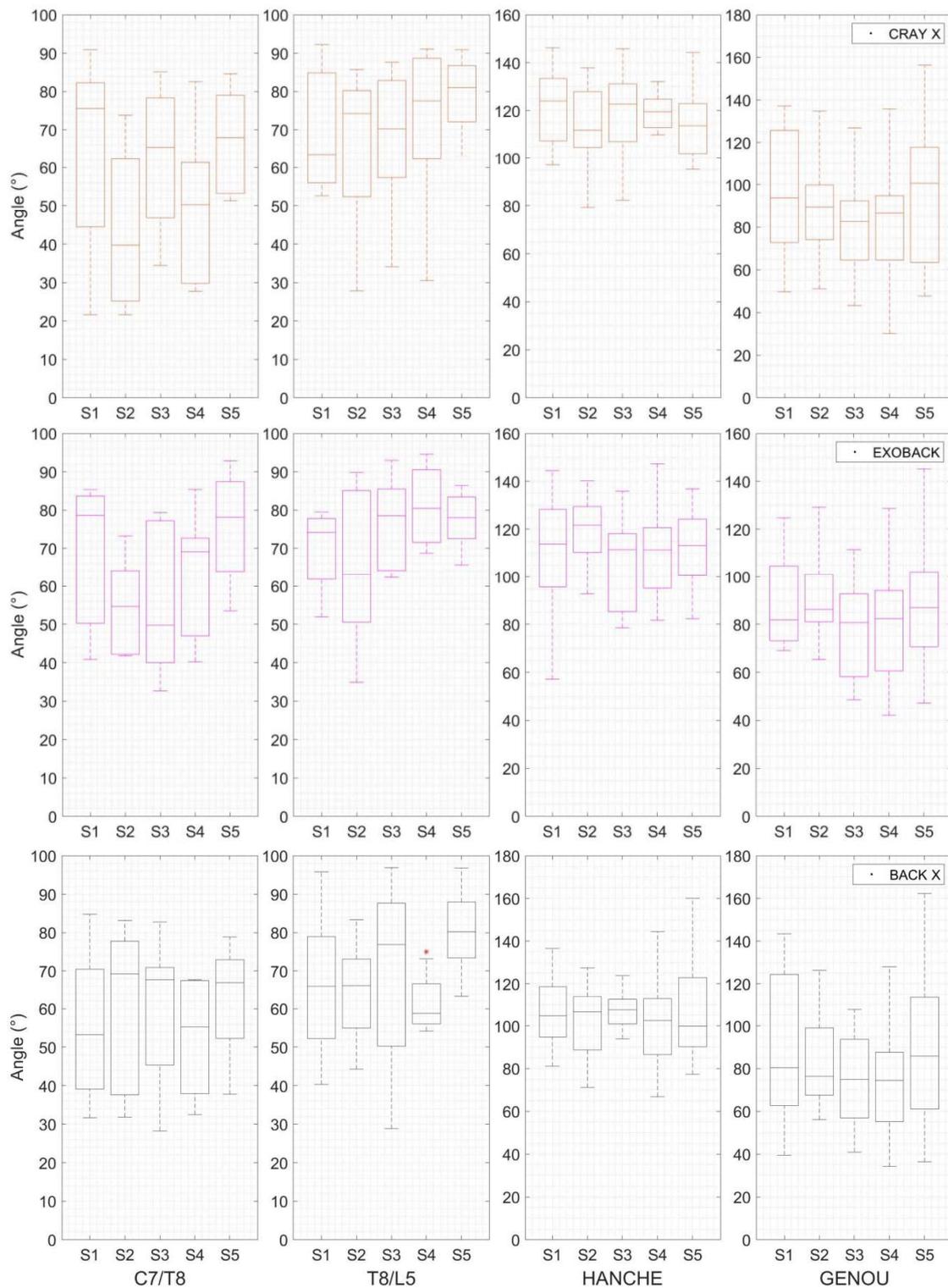


Figure 14 : Amplitudes articulaires – PRECISION.

Boxplots des amplitudes articulaires (en degrés) sur PRECISION pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes : Cray X<sup>TM</sup> (orange), Exoback<sup>TM</sup> (rose), et Back X<sup>TM</sup> (gris). Les astérisques indiquent des résultats statistiquement significatifs : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$ . Les astérisques rouges indiquent une différence statistique par rapport à la première séance.

### 3.3. Fluidité du mouvement

#### 3.3.1. MAN-S

Les deux modalités de RAP ont présenté des évolutions significatives sur la fluidité de différentes articulations pour la tâche MAN-S (*Figure 15*). Lors de l'utilisation du Cray X<sup>TM</sup>, la fluidité au niveau de l'articulation T8/L5 était significativement meilleure en séance 4 par rapport à la dernière séance ( $p < 0,05$ ). Pour l'articulation de la hanche, la fluidité était significativement supérieure lors de la troisième séance par rapport à la première ( $p < 0,05$ ). Quant à l'Exoback<sup>TM</sup>, son usage a significativement diminué la fluidité au niveau de l'articulation C7/T8 lors des séances 3 et 4 au regard de la première ( $p < 0,05$ ). De plus, il a significativement diminué la fluidité de l'articulation T8/L5 de la séance 3 jusqu'à la séance 5 au regard de la première ( $p < 0,01$ ). Aucune évolution significative ( $p > 0,05$ ) n'a été observée pour l'utilisation du Back X<sup>TM</sup>.

#### 3.3.2. PRECISION

Pour la tâche PRECISION, malgré l'observation visuelle d'une possible amélioration de la fluidité pour les articulations C7/T8, T8/L5 et hanche, aucune évolution significative ( $p > 0,05$ ) n'a été observée au cours des cinq séances d'entraînement quelles que soient l'articulation et la modalité d'exosquelette (*Figure 16*).

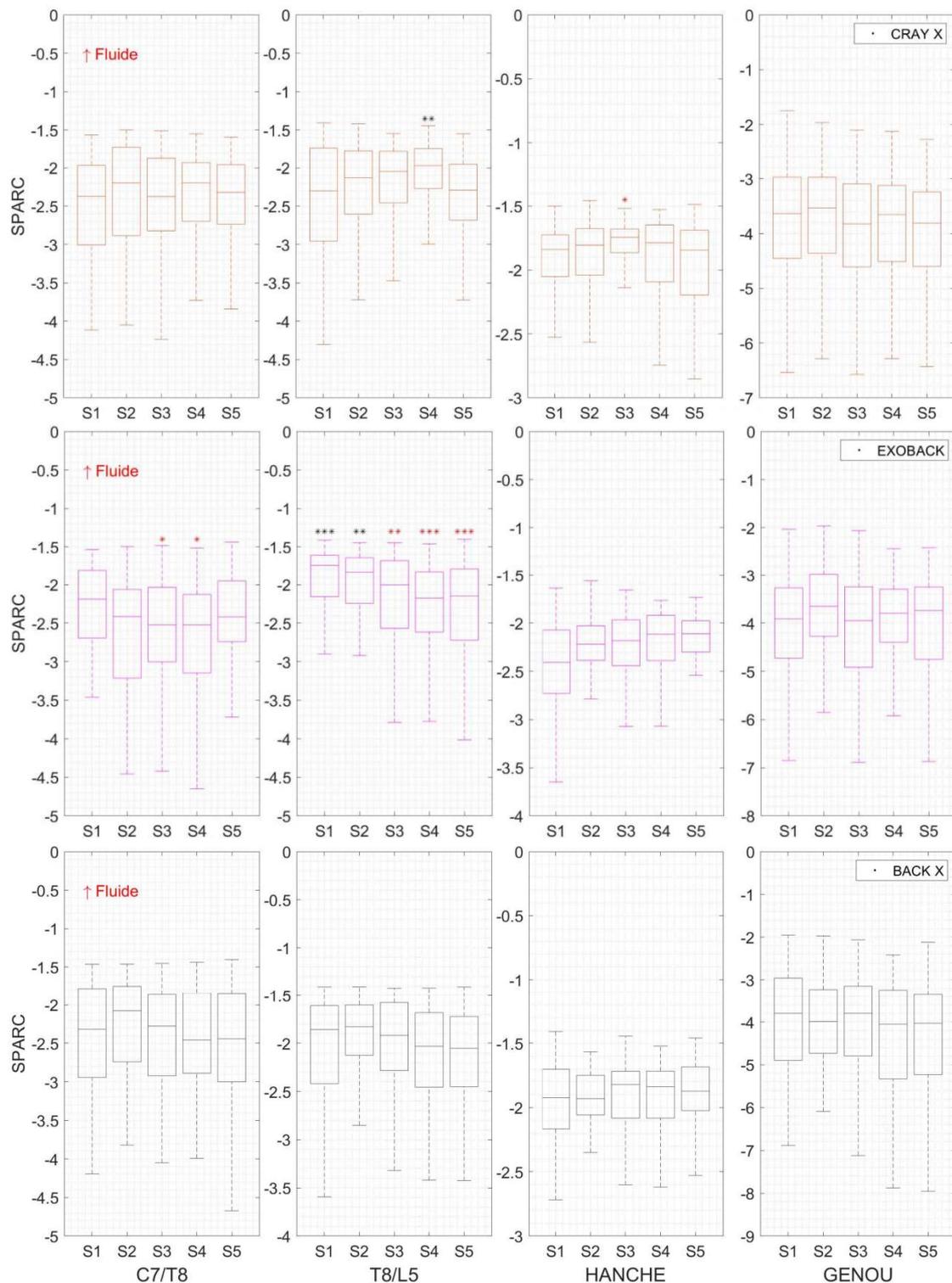


Figure 15 : Fluidité du mouvement - MAN-S.

Boxplots de la fluidité du mouvement des différentes articulations sur MAN-S pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes : Cray X<sup>TM</sup> (orange), Exoback<sup>TM</sup> (rose), et Back X<sup>TM</sup> (gris). Les astérisques indiquent des résultats statistiquement significatifs : \*  $p < 0,05$  ; \*\*  $p < 0,01$  ; \*\*\*  $p < 0,001$ . Les astérisques rouges indiquent une différence statistique par rapport à la première séance. Les astérisques noirs indiquent une différence statistique au regard de la dernière séance.

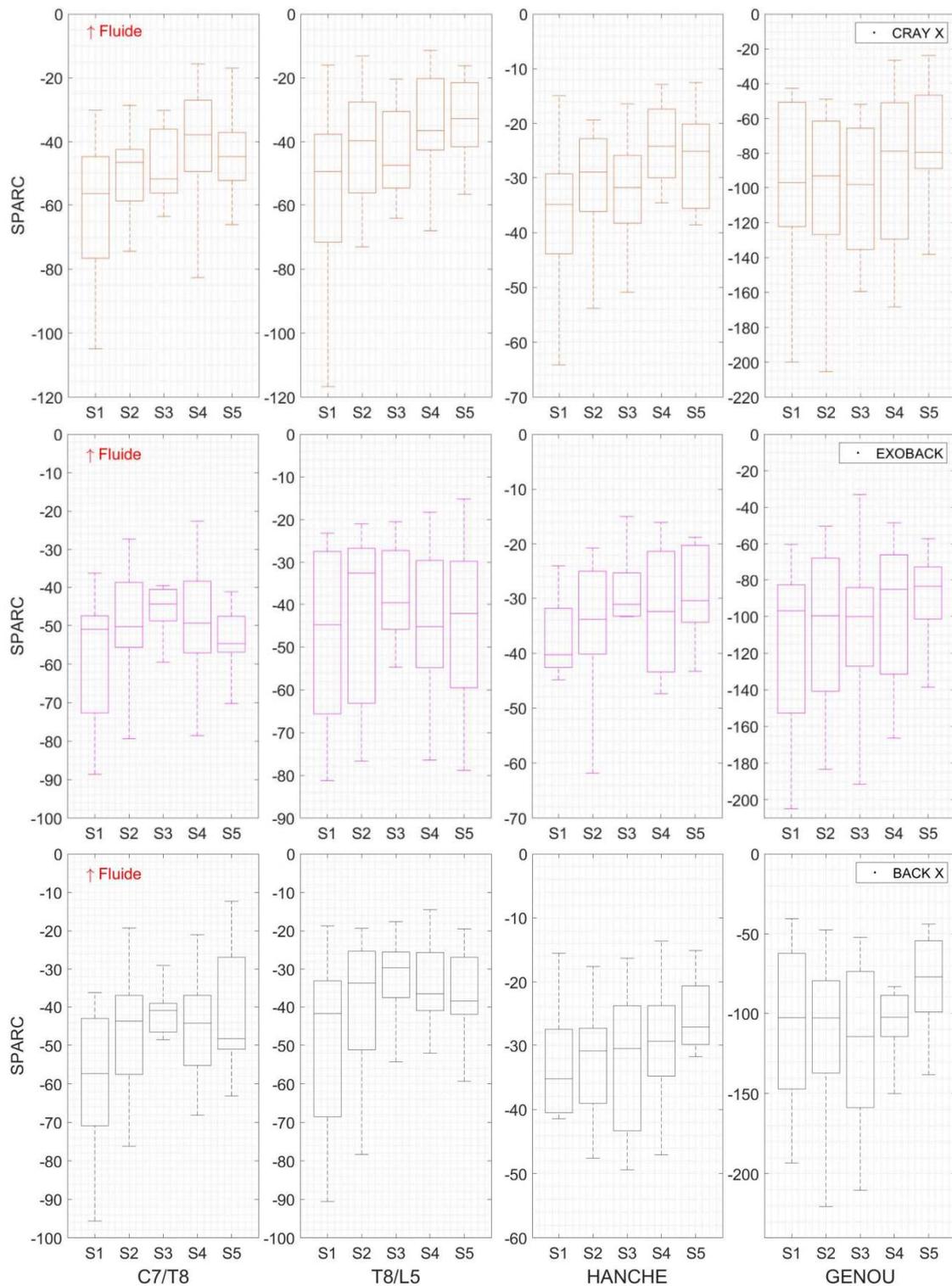


Figure 16 : Fluidité du mouvement – PRECISION.

Boxplots de la fluidité du mouvement des différentes articulations sur PRECISION pour chacune des 5 séances (S1 à S5) pour les 3 exosquelettes : Cray X™ (orange), Exoback™ (rose), et Back X™ (gris).

#### IV. DISCUSSION

Partant du postulat que l'entraînement à l'usage d'exosquelette est à l'origine d'apprentissages moteurs, l'objectif principal de ce travail était de déterminer si l'évaluation des performances motrices, d'une part, et de descripteurs cinématiques de l'organisation du mouvement d'autre part, tels que les amplitudes articulaires et la fluidité pouvaient être considérés comme des indices pertinents de ces apprentissages. A cet effet, ce travail a testé l'hypothèse que ces variables démontreraient une évolution significative au cours d'un programme d'entraînements répétés à l'usage d'exosquelettes professionnels assistant le dos, et ce, pour les différentes tâches proposées ici. Dans le cas de la vérification de cette hypothèse, le deuxième objectif était de définir parmi les critères explorés, ceux considérés comme pertinents quant à l'évaluation de la familiarisation à l'usage d'exosquelettes, en marquant une stabilisation significative dans leur évolution au cours de la période d'entraînement.

Au cours des cinq séances d'entraînement, nous avons pu observer, pour les trois exosquelettes utilisés, une amélioration significative de la performance lors de la tâche PRECISION ainsi qu'une diminution significative de l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension sur la tâche MAN-S. De plus, dans leurs évolutions, ces deux variables ont présenté une phase de stabilisation au cours des dernières séances, ce qui pourrait caractériser un processus de familiarisation à l'usage d'exosquelettes d'assistance du dos (*Tableau 3*). Toutefois, selon l'exosquelette utilisé, toutes les variables investiguées n'ont ni présenté la même évolution, ni démontré de phase de stabilisation similaire. Le tableau 3, présenté ci-dessous, permet de synthétiser nos résultats qui sont ensuite discutés au regard de nos trois hypothèses.

Tableau 3 : Récapitulatif des variables pouvant caractériser un processus d'apprentissage moteur à l'usage d'exosquelettes d'assistance du dos.

Variables dépendantes	MAN-S/MAN-S Libre			PRECISION		
	CRAY X	EXOBACK	BACK X	CRAY X	EXOBACK	BACK X
Performance				● ●	● ●	● ●
Amplitudes articulaires : - C7/T8 - T8/L5 - Hanche - Genou	○ ○ ● ●	● ● ● ● ● ●	○ ○ ● ●			○
Fluidité du mouvement : - C7/T8 - T8/L5 - Hanche - Genou		○ ● ●				

- Evolution nette par rapport à S1.
- Obtention d'une phase de stabilisation.

○ Faible évolution par rapport à S1.

#### 4.1.Apprentissages moteurs

La première hypothèse que nous avons émise était que les paramètres analysés au cours des cinq séances d'entraînement proposées évolueraient de manière significative. En lien avec les résultats obtenus pour la performance dans la tâche PRECISION et les amplitudes articulaires du genou en flexion/extension dans la tâche MAN-S, qui présentaient une évolution significative au regard de la première séance, nous pouvons valider notre première hypothèse. L'évolution de la performance lors d'une tâche nouvelle comme PRECISION, est concordante par rapport aux travaux traitant de l'apprentissage moteur (Adams, 1952 ; Lee, 2019).

Si le temps de réalisation des trois cycles intermédiaires sur la tâche MAN-S Libre n'a pas évolué significativement au cours des cinq séances d'entraînement, ceci pourrait être dû au fait que la consigne n'était pas de rechercher une performance maximale contrairement à la tâche PRECISION. Par ailleurs, ceci peut également être dû au fait que la motricité à adopter sur cette tâche faisait potentiellement déjà partie du répertoire moteur des participants. En effet, tout comme MAN-S Libre, beaucoup de tâches que nous retrouvons dans notre quotidien, comme par exemple ramasser un objet au sol, se vêtir ou se chausser, impliquent la flexion/extension du tronc. En lien avec les consignes de réalisation des tâches, une autre explication pourrait être

que, lors de la tâche MAN-S Libre, ces exosquelettes ont guidé les utilisateurs dans la totalité de leur mouvement d'extension du tronc, tandis que la tâche PRECISION permettait une plus grande liberté dans l'organisation motrice pour sa réalisation. Ce point pourrait être une explication plausible du fait qu'aucune adaptation en termes de cinématique et de fluidité n'a été observée lors de la tâche PRECISION.

Les adaptations cinématiques induites par l'utilisation des trois exosquelettes sur l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension lors de MAN-S sont potentiellement la preuve d'une nécessaire réorganisation du contrôle moteur lors de la réalisation de tâches motrices avec exosquelette. Tout comme les travaux ayant observé des modifications dans la cinématique de l'articulation du genou (Bosch et al., 2016 ; Simon et al., 2021), cette réorganisation motrice au niveau de cette articulation pourrait être due au fait que les exosquelettes d'assistance du dos évalués ici, présentaient des points d'appui au niveau des cuisses (juste au-dessus des genoux). De ce fait, il se pourrait également que dans l'ensemble de la chaîne posturale, cette articulation soit la première à subir le transfert des forces produites par les différents systèmes d'assistance du dos par l'intermédiaire de ces points d'appuis. Aussi, les participants ont pu être à la recherche de leur propre motricité au cours de la période d'entraînement du fait des modifications cinématiques transitoires induites par l'usage d'exosquelettes. La réorganisation du contrôle moteur ne s'est pas opérée de la même manière entre les autres articulations (C7/T8, T8/L5 et hanche) ni entre les différents exosquelettes. Il est probable que ces articulations étaient contraintes, et ce différemment en fonction de la conception des trois systèmes d'assistance du dos. De ce fait, il se pourrait que les coordinations motrices au niveau de ces articulations n'ont pas évolué de façon similaire et n'ont pas pu être stabilisées.

Par ailleurs, très peu d'évolution dans la fluidité du mouvement a été observée lors de MAN-S. Ceci peut être dû à la cadence imposée lors de cette tâche, dans laquelle, les profils de vitesses angulaires sont probablement restés identiques, même si les amplitudes articulaires ont évolué. La réorganisation du contrôle moteur s'est donc probablement opérée uniquement au niveau des amplitudes articulaires sans pour autant modifier les vitesses angulaires et donc la fluidité du mouvement.

#### **4.2. Processus de familiarisation**

Le deuxième objectif était de déterminer si les participants avaient atteint un stade de familiarisation au cours des cinq séances d'entraînement. Il s'agissait ici de définir parmi les

critères explorés, ceux considérés comme pertinents quant à l'évaluation de la familiarisation à l'usage d'exosquelettes, témoignant d'une stabilisation dans leur évolution. Nous avons émis l'hypothèse qu'au cours des différentes séances d'entraînement, le marqueur d'apprentissage moteur le plus global évalué lors des tâches d'apprentissage (la performance) atteindrait un état stable dans son évolution. Au vu des résultats que nous avons obtenus, nous pouvons valider cette hypothèse, mais uniquement pour la tâche PRECISION. En effet, selon la modalité d'exosquelette, la performance réalisée s'est, au plus tard, stabilisée à partir de la quatrième séance (la performance à la séance 4 n'étant pas statistiquement différente de celle réalisée à la dernière séance). Cependant, nous ne pouvons pas affirmer que si d'autres séances d'entraînement avaient eu lieu, la performance n'aurait pas évolué davantage. En 2018, Schwartz avait observé une évolution du temps de mouvement lors d'une tâche de dextérité manuelle entre les deuxième et troisième séances d'entraînement à l'utilisation d'un DAP assistant le dos (Schwartz, 2018). Dans cette étude, trois séances ont également semblé suffisantes pour atteindre une stabilisation de la performance lors de l'utilisation d'un RAP d'assistance du dos (Cray X<sup>TM</sup>), contrairement au DAP (Back X<sup>TM</sup>), pour lequel ce paramètre s'est stabilisé à partir de la quatrième séance. Lors de la tâche MAN-S, l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension a également atteint un état stable dans son évolution quel que soit l'exosquelette utilisé. Aussi, cette amplitude s'est, au plus tard, stabilisée à la quatrième séance. En effet, lors de l'utilisation du Back X<sup>TM</sup>, l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension n'était pas significativement différente entre les troisième et quatrième séances ( $p > 0,05$ ). Le caractère stable dans l'évolution de cette amplitude pourrait donc être un marqueur d'une stabilisation de la coordination motrice.

Pour une séance d'entraînement, l'utilisation de chaque exosquelette représentait une durée d'environ 30 minutes. Au regard des études mentionnant une durée d'entraînement avec l'exosquelette (*Tableau 1*), seulement trois ont respecté une durée minimale de 120 minutes d'entraînement (4 séances de 30 minutes) pour un seul exosquelette préalablement à l'évaluation de ses effets (Gillette, & Stephenson, 2019 ; Smets, 2019 ; Theurel et al., 2018). Il est alors possible que ces trois études soient les seules à avoir évalué des effets non transitoires de l'utilisation d'exosquelettes.

### **4.3. Facteurs pouvant impacter ce processus**

Enfin, le dernier objectif de ce travail était de déterminer si la familiarisation à l'usage d'exosquelettes était dépendante de facteurs tels que le type de tâche ou encore les caractéristiques de l'exosquelette (RAP versus DAP, par exemple). Les effets transitoires (sans phase d'apprentissage) liés à l'utilisation d'exosquelettes étant variables selon le type de tâche et les caractéristiques du système, nous avons donc fait l'hypothèse que l'atteinte du stade de familiarisation serait également dépendante du type de tâche effectuée et des caractéristiques de l'exosquelette utilisé. Au regard des résultats obtenus, cette dernière hypothèse peut également être validée. Selon le type de l'exosquelette utilisé (RAP ou DAP), la performance sur la tâche PRECISION n'a pas évolué de façon similaire et a semblé progresser plus lentement lors de l'utilisation du Back X<sup>TM</sup>. Néanmoins, nous pouvons remarquer que la performance initiale sur la tâche PRECISION semblait être supérieure lors de l'utilisation du DAP (Back X<sup>TM</sup>) par rapport aux deux RAP. De plus, rappelons que lors de l'utilisation du Back X<sup>TM</sup>, l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension lors de la séance 3 était significativement inférieure au regard de celle mesurée à la première séance et significativement supérieure à celle mesurée à la dernière séance, chose que nous n'avons pas observé lors de l'utilisation des deux RAP. L'utilisation du Back X<sup>TM</sup> semblerait donc permettre des adaptations cinématiques plus progressives que celles observées avec l'utilisation des deux autres exosquelettes.

### **4.4. Limitations et perspectives**

Certains choix méthodologiques ont pu influencer nos résultats et méritent donc d'être discutés. L'entraînement en simultané à l'utilisation de différents exosquelettes, n'ayant pas les mêmes caractéristiques, au sein de notre protocole d'entraînement a pu potentiellement engendrer un effet de croisement dans la survenue des apprentissages moteurs propres à chaque exosquelette. Pour obtenir des résultats spécifiques à un exosquelette, il serait donc souhaitable de mettre en place un protocole d'entraînement propre à l'utilisation de l'exosquelette faisant l'objet d'une volonté d'évaluation. Dans notre travail, nous avons fait le choix d'intégrer les trois exosquelettes au protocole d'entraînement car, au regard de la journée expérimentale, ceux-ci faisaient l'objet d'évaluations simultanées. Les volontaires devaient donc être entraînés avec le même temps d'utilisation pour chaque exosquelette.

Le caractère exploratoire de cette étude sur cinq séances d'entraînement nous a limité en termes de variables physiologiques étudiées. Par exemple, sur la base des travaux ayant étudié les

adaptations électromyographiques se produisant sur une ou plusieurs séances d'entraînement à l'utilisation d'exosquelettes (Gordon, & Ferris, 2007 ; Galle, Malcolm, Derave, & De Clercq, 2013 ; Koller, Jacobs, Ferris, & Remy, 2015 ; Sawicki, & Ferris, 2008), il aurait été pertinent d'investiguer également ces variables lors des séances d'entraînement à l'usage d'exosquelettes assistant le dos. Toutefois, au regard de la préparation nécessaire à l'investigation des activités neuromusculaires par EMG (rasage et abrasement) et des irritations cutanées, nous n'avions pas souhaité mettre en place un protocole impliquant le recueil systématique de ce type de variables, sur chaque séance, en sachant que la durée imposée entre chaque séance d'entraînement était comprise entre 3 et 7 jours. Evaluer l'évolution des activités neuromusculaires au cours d'un processus d'apprentissage nécessiterait donc un temps de repos supérieur entre chaque séance. Néanmoins, cela pourrait potentiellement impacter le processus d'apprentissage pour lequel nous ne savons pas encore quel est le meilleur compromis entre le temps d'entraînement par séance et le temps de repos nécessaire entre chaque séance pour permettre la survenue d'apprentissages moteurs « online » (intra-séance) et « offline » (inter-séance) optimaux. En concordance avec ce qui avait pu être observé dans les travaux de Newell et al. (2001) (*Figure 2*), Lee (2019) avait montré que lors de l'entraînement à la réalisation d'une tâche motrice étalée sur plusieurs sessions, l'apprentissage moteur suivait des phases de progression et de régression. La phase « online » se caractérisait par une progression dans la performance alors que la phase « offline » se caractérisait par une diminution de la performance.

Enfin, l'utilisation de variables discrètes dans l'analyse du mouvement humain est puissante mais peut ne pas être suffisante pour fournir une description exhaustive du mouvement observé (Stergiou, 2018). Lorsqu'une seule mesure est extraite d'une variable continue, une grande quantité d'informations utiles peuvent potentiellement ne pas être prises en compte (Queen, Gross, & Liu, 2006). En effet, le profil des courbes cinématiques est souvent un indicateur robuste de la manière dont une tâche motrice est accomplie et peut aider les scientifiques à déterminer le comportement d'un individu et/ou à identifier les caractéristiques des potentielles adaptations motrices au cours du temps (Queen et al., 2006). Il aurait donc été tout aussi pertinent de s'intéresser aux profils cinématiques, notamment ceux de la flexion du genou lors de la tâche MAN-S, afin de vérifier la présence d'une potentielle stabilisation au cours des différentes séances d'entraînement.

## V. CONCLUSION

Ce travail a montré que la performance et l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension peuvent être considérées comme des indices pertinents d'un processus de familiarisation à l'usage d'exosquelettes d'assistance du dos. Ces variables semblent toutefois dépendantes de la tâche réalisée. Au regard de nos résultats, il apparaît par ailleurs que le fait de ne pas intégrer de période d'entraînement suffisamment longue aux protocoles visant à évaluer les effets d'un exosquelette, représente une forte limite à ces évaluations. Les effets transitoires (sans apprentissages moteurs) liés à l'utilisation de ces technologies pourraient avoir autant d'impact que les effets strictement liés aux dispositifs. Toute nouvelle étude devrait alors impérativement considérer une phase d'entraînement à l'utilisation de l'exosquelette préalablement à l'évaluation de ses effets jusqu'à observer un état stable de certains paramètres.

En termes de prévention des risques de TMS et notamment des lombalgies, il apparaît donc nécessaire pour les entreprises, de mettre en place un temps d'adaptation à l'exosquelette avant d'évaluer si ce dispositif permet d'apporter de réels bénéfices et s'il est accepté par ses utilisateurs. De plus, le choix de la tâche permettant d'évaluer l'atteinte du stade de familiarisation est primordial. Celle-ci devrait être complexe et non-habituelle pour les utilisateurs. La stabilisation des performances maximales lors de cette tâche avec exosquelette pourrait être retenue comme indice favorable à l'évaluation de ces effets en situations réelle de travail.

Néanmoins, il reste tout aussi légitime de se demander si de nouvelles stratégies de réorganisations motrices peuvent potentiellement se mettre en place du fait d'une utilisation d'un exosquelette à plus long terme. Est-ce que le processus de familiarisation est pérenne ou est-ce que de nouvelles adaptations motrices se mettent en place avec l'expérience grandissante de l'opérateur ? Ces éléments mériteraient d'être évalués pour mieux comprendre l'impact réel à long terme de ces nouvelles technologies.

## VI. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abdoli-Eramaki, M., Agnew, M. J., & Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21(5), 456-465. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.12.021
- Adams, J. A. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-150. doi: 10.1080/00222895.1971.10734898
- Alemi, M.M.; Madinei, S.; Kim, S.; Srinivasan, D.; Nussbaum, M.A. Effects of Two Passive Back-Support Exoskeletons on Muscle Activity, Energy Expenditure, and Subjective Assessments During Repetitive Lifting. *Hum Factors* 2020, 18720819897669, doi:10.1177/0018720819897669
- ANAES, Diagnostic, prise en charge et suivi des malades atteints de lombalgie chronique. 2000, Agence Nationale d'Accréditation et d'Evaluation en Santé: Paris
- Andersson, G. B. J. (1997). The epidemiology of spinal disorders. The adult spine: principles and practice. Edited by: Frymoyer JW. doi: 10.1080/17453674.1998.11744790
- Atain Kouadio Jean-Jacques, Zana Jean-Pierre, et alii, 2011. Vous avez dit TMS ? Brochure INRS ED 6094. Paris : p. 4-6.
- Atain Kouadio Jean-Jacques, Kerangueven Laurent, Turpin-Legendre Emmanuelle, 2018. Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise. Guide pour les préventeurs. Brochure INRS ED 6315. Paris : p. 23.
- Balasubramanian, S., Melendez-Calderon, A., Roby-Brami, A., & Burdet, E. (2015). On the analysis of movement smoothness. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 1-11. doi: 10.1186/10.1186/s12984-015-0090-9
- Baltrusch, S., van Dieen, J., van Bennekom, C., & Houdijk, H. (2020). Testing an Exoskeleton That Helps Workers With Lower-Back Pain: Less Discomfort With the Passive SPEXOR Trunk Device. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 0–0. doi:10.1109/mra.2019.2954160
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied ergonomics*, 54, 212-217. doi: 10.1016/j.apergo.2015.12.003

- Chen, H., Schall Jr, M. C., & Fethke, N. (2018). Accuracy of angular displacements and velocities from inertial-based inclinometers. *Applied ergonomics*, 67, 151-161. doi: 10.1016/j.apergo.2017.09.007
- CNAM (2020), Rapport de gestion de 2019 de la Caisse Nationale de l'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés, 137.
- CNAM (2016), Dossier de presse, Accidents du travail et maladies professionnelles.
- CNAM (2021), Les TMS dans votre secteur d'activité. <https://www.ameli.fr/entreprise/sante-travail/risques/troubles-musculosquelettiques-tms/secteurs-activite>
- 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. doi: 10.1080/00140139.2015.1081988
- De Vries, A., Murphy, M., Könemann, R., Kingma, I., & de Looze, M. (2019). The Amount of Support Provided by a Passive Arm Support Exoskeleton in a Range of Elevated Arm Postures. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 311-321. doi: 10.1080/24725838.2019.1669736
- Deyo, R. A., Cherkin, D., Conrad, D., & Volinn, E. (1991). Cost, controversy, crisis: low back pain and the health of the public. *Annual review of public health*, 12(1), 141-156. doi: 10.1146/annurev.pu.12.050191.001041
- Dionne, C. E., Dunn, K. M., & Croft, P. R. (2006). Does back pain prevalence really decrease with increasing age? A systematic review. *Age and ageing*, 35(3), 229-234. doi: 10.1093/ageing/afj055
- Favenne, A., Etude du processus de familiarisation à l'usage d'un dispositif d'assistance au mouvement : conséquences physiologiques et biomécaniques, mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du grade de master STAPS, sous la direction des Dr. Jean Theurel (INRS) et Guillaume Mornieux (Université de Lorraine), 2020.
- Fong, J., Crocher, V., Oetomo, D., & Tan, Y. (2015, April). An investigation into the reliability of upper-limb robotic exoskeleton measurements for clinical evaluation in neurorehabilitation. In 2015 7th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER) (pp. 795-798). IEEE. doi: 10.1109/NER.2015.7146743
- Frost, D. M., Abdoli-E, M., & Stevenson, J. M. (2009). PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG

- during symmetrical lifting tasks. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 19(6), e403-e412. doi: 10.1016/j.jelekin.2008.12.002
- Gagnon, D. H., Escalona, M. J., Vermette, M., Carvalho, L. P., Karelis, A. D., Duclos, C., & Aubertin-Leheudre, M. (2018). Locomotor training using an overground robotic exoskeleton in long-term manual wheelchair users with a chronic spinal cord injury living in the community: Lessons learned from a feasibility study in terms of recruitment, attendance, learnability, performance and safety. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 15(1), 1-12. doi: 10.1186/s12984-018-0354-2
- Galle, S., Malcolm, P., Derave, W., & De Clercq, D. (2013). Adaptation to walking with an exoskeleton that assists ankle extension. *Gait, & posture*, 38(3), 495-499. doi: 10.1016/j.gaitpost.2013.01.029
- Georgarakis, A. M., Song, J., Wolf, P., Riener, R., & Xiloyannis, M. (2020). Control for gravity compensation in tendon-driven upper limb exosuits. In 2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob) (pp. 340-345). IEEE. doi: 10.1109/biorob49111.2020.9224460
- Gillette, J. C., & Stephenson, M. L. (2019). Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 302-310. doi: 10.1080/24725838.2019.1665596
- Gordon, K. E., & Ferris, D. P. (2007). Learning to walk with a robotic ankle exoskeleton. *Journal of biomechanics*, 40(12), 2636-2644. doi: 10.1016/j.jbiomech.2006.12.006
- M. Goršič, Y. Song, B. Dai, D. Novak, Evaluation of the HeroWear Apex back-assist exosuit during multiple brief tasks, *Journal of Biomechanics* (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110620>
- Graham, R. B., Agnew, M. J., & Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40(5), 936-942. doi: 10.1016/j.apergo.2009.01.006
- INRS (2020), Lombalgie. <https://www.inrs.fr/risques/lombalgies/facteurs-risques.html>
- Jin, X., Cui, X., & Agrawal, S. K. (2015, May). Design of a cable-driven active leg exoskeleton (c-alex) and gait training experiments with human subjects. In 2015 IEEE International

- Conference on Robotics and Automation (ICRA) (pp. 5578-5583). IEEE. doi: 10.1186/s12984-018-0354-2
- Karni, A., Meyer, G., Rey-Hipolito, C., Jezzard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1998). The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(3), 861-868.
- Kent, P. M., & Keating, J. L. (2005). The epidemiology of low back pain in primary care. *Chiropractic, & osteopathy*, 13(1), 1-7. doi: 10.1186/1746-1340-13-13
- Kim, S., & Nussbaum, M. A. (2019). A follow-up study of the effects of an arm support exoskeleton on physical demands and task performance during simulated overhead work. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 163-174. doi: 10.1080/24725838.2018.1551255
- Koller, J. R., Jacobs, D. A., Ferris, D. P., & Remy, C. D. (2015). Learning to walk with an adaptive gain proportional myoelectric controller for a robotic ankle exoskeleton. *Journal of neuroengineering and rehabilitation*, 12(1), 1-14. doi: 10.1186/s12984-015-0086-5
- Koopman, A. S., Kingma, I., Faber, G. S., de Looze, M. P., & van Dieën, J. H. (2019). Effects of a passive exoskeleton on the mechanical loading of the low back in static holding tasks. *Journal of Biomechanics*, 83, 97–103. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.033
- Koopman, A. S., Näf, M., Baltrusch, S. J., Kingma, I., Rodriguez-Guerrero, C., Babič, J., ..., & van Dieën, J. H. (2020). Biomechanical evaluation of a new passive back support exoskeleton. *Journal of Biomechanics*, 105, 109795. doi: 10.1016/j.jbiomech.2020.109795
- Kozinc, Ž., Baltrusch, S., Houdijk, H., & Šarabon, N. (2020). Short-Term Effects of a Passive Spinal Exoskeleton on Functional Performance, Discomfort and User Satisfaction in Patients with Low Back Pain. *Journal of Occupational Rehabilitation*. doi:10.1007/s10926-020-09899-7
- Lee, T. D., Swanson, L. R., & Hall, A. L. (1991). What Is Repeated in a Repetition? Effects of Practice Conditions on Motor Skill Acquisition. *Physical Therapy*, 71(2), 150–156. doi: 10.1093/ptj/71.2.150

- Lee, M.-H. (2019). Online and offline contributions to motor learning change with practice, but are similar across development. *Experimental Brain Research*, 237(11), 2865-2873. doi: 10.1007/s00221-019-05639-3
- Lidgren, L. (2003). The bone and joint decade 2000-2010.
- Little, K., Antuvan, C. W., Xiloyannis, M., De Noronha, B. A., Kim, Y. G., Masia, L., & Accoto, D. (2019, June). IMU-based assistance modulation in upper limb soft wearable exosuits. In 2019 IEEE 16th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR) (pp. 1197-1202). IEEE. doi: 10.1109/ICORR.2019.8779362
- Luger, T., Cobb, T. J., Seibt, R., Rieger, M. A., & Steinhilber, B. (2019). Subjective evaluation of a passive lower-limb industrial exoskeleton used during simulated assembly. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 175-184. doi: 10.1080/24725838.2018.1560376
- McFarland, T., & Fischer, S. (2019). Considerations for Industrial Use : A Systematic Review of the Impact of Active and Passive Upper Limb Exoskeletons on Physical Exposures. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 322-347. doi: 10.1080/24725838.2019.1684399
- Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J. F. (2019). Development of an acceptance model for occupational exoskeletons and application for a passive upper limb device. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 291-301. doi: 10.1080/24725838.2019.1662516
- Newell, K. M., Liu, Y. T., & Mayer-Kress, G. (2001). Time scales in motor learning and development. *Psychological review*, 108(1), 57. doi: 10.1037//0033-295x. 108.1 .57
- Pan, F.; Firouzabadi, A.; Zander, T.; Schmidt, H. Sex-dependent differences in lumbo-pelvic coordination for different lifting tasks: A study on asymptomatic adults. *J Biomech* 2020, 102, 109505, doi:10.1016/j.jbiomech.2019.109505
- Park, H., Kim, S., Winstein, C. J., Gordon, J., & Schweighofer, N. (2016). Short-duration and intensive training improves long-term reaching performance in individuals with chronic stroke. *Neurorehabilitation and neural repair*, 30(6), 551-561. doi: 10.1177/1545968315606990

- Queen, R. M., Gross, M. T., & Liu, H. Y. (2006). Repeatability of lower extremity kinetics and kinematics for standardized and self-selected running speeds. *Gait & posture*, 23(3), 282-287. doi: 10.1016/j.gaitpost.2005.03.007
- Reuschel, E., Barabas, S., Zeman, F., Bendfeldt, H., Rascle, A., Deml, L., & Seelbach-Goebel, B. (2016). Functional impairment of CMV-reactive cellular immunity during pregnancy. *Journal of Medical Virology*, 89(2), 324–331. doi:10.1002/jmv.24639
- Sadler, E. M., Graham, R. B., & Stevenson, J. M. (2011). The personal lift-assist device and lifting technique: a principal component analysis. *Ergonomics*, 54(4), 392-402. doi: 10.1080/00140139.2011.556259
- Sawicki, G. S., & Ferris, D. P. (2008). Mechanics and energetics of level walking with powered ankle exoskeletons. *Journal of Experimental Biology*, 211(9), 1402-1413. doi: 10.1242/jeb.009241
- Schwartz, M., Conséquences physiologiques de l'usage d'exosquelettes lors de tâches de manutention manuelle, mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du grade de master STAPS, sous la direction des Dr. Kévin Desbrosses (INRS) et Guillaume Mornieux (Université de Lorraine), 2018.
- Schwartz, M.; Theurel, J.; Desbrosses, K. Effectiveness of Soft Versus Rigid Back-Support Exoskeletons during a Lifting Task. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 8062. <https://doi.org/10.3390/ijerph18158062>
- Sejnowski, T. J. (1998). Making smooth moves. *Nature*, 394(6695), 725-726. doi: 10.1038/29406
- Simon, A. A., Alemi, M. M., & Asbeck, A. T. (2021). Kinematic effects of a passive lift assistive exoskeleton. *Journal of Biomechanics*, 120, 110317. doi: 10.1016/j.jbiomech.2021.110317
- Smets, M. (2019). A field evaluation of arm-support exoskeletons for overhead work applications in automotive assembly. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 192-198. doi: 10.1080/24725838.2018.1563010
- Steenstra, I. A., Verbeek, J. H., Heymans, M. W., & Bongers, P. M. (2005). Prognostic factors for duration of sick leave in patients sick listed with acute low back pain: a systematic review of the literature. *Occupational and environmental medicine*, 62(12), 851-860. doi: 10.1136/oem.2004.015842

- St-Vincent, M., Tellier, C., & Lortte, M. (1989). Training in handling: an evaluative study. *Ergonomics*, 32(2), 191-210. doi: 10.1080/00140138908966079
- Theelin, A., Holmberg, S., & Theelin, N. (2008). Functioning in neck and low back pain from a 12-year perspective: a prospective population-based study. *Journal of Rehabilitation Medicine*, 40(7), 555-561. doi: 10.2340/16501977-0205
- Theurel, J., Claudon, L., (2018). Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs : état des connaissances. INRS.
- 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. doi: 10.1016/j.apergo.2017.10.008
- Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational Exoskeletons : Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-17. doi: 10.1080/24725838.2019.1638331
- Ulrey, B. L., & Fathallah, F. A. (2013). Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 23(1), 206-215. doi: 10.1016/j.jelekin.2012.08.016
- Van Abswoude, F., Santos-Vieira, B., van der Kamp, J., & Steenbergen, B. (2015). The influence of errors during practice on motor learning in young individuals with cerebral palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 45, 353-364. doi: 10.1016/j.ridd.2015.08.008
- Van Dieën, J. H., Hoozemans, M. J., & Toussaint, H. M. (1999). Stoop or squat: a review of biomechanical studies on lifting technique. *Clinical Biomechanics*, 14(10), 685-696. doi: 10.1016/S0268-0033(99)00031-5
- Van Engelhoven, L., Poon, N., Kazerooni, H., Rempel, D., Barr, A., & Harris-Adamson, C. (2019). Experimental evaluation of a shoulder-support exoskeleton for overhead work: Influences of peak torque amplitude, task, and tool mass. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 250-263. doi: 10.1080/24725838.2019.1637799

## VII. ANNEXE : LES DIFFERENTES TACHES D'ENTRAÎNEMENT

### 1. Tâche MAN-S

Cette tâche de manutention répétitive dans le plan sagittal, identique à celle évaluée lors de la journée expérimentale, consistait pour les participants à déplacer des charges de 5 et 15 kg de 33,0 cm de longueur, 13,6 cm de largeur et 15,6 cm de hauteur depuis une plateforme positionnée à la hauteur des chevilles vers un support vertical situé à la hauteur des coudes du participant, et inversement, tout en gardant constamment une légère flexion des genoux. La cadence imposée lors de cette tâche était de 15 cycles par minute. Deux essais ont été réalisés pour cette tâche de manutention. Ces deux essais étaient séparés d'une période de récupération de 30 secondes. Un essai correspondait à la réalisation de cinq cycles. Chaque cycle consistait à l'action de soulever la charge de la plateforme située au niveau des chevilles (1) pour aller toucher le support vertical (2) avec la caisse puis la reposer sur la plateforme de départ (1) (*Figure 7*). Chacun des éléments (1) et (2) était équipé de quatre capteurs inductifs (XS112B3PAL2, Schneider Electric, France) servant à détecter les instants de contact entre la charge et les supports. Cette détection permettait de dissocier les phases de montées (extension du tronc) et de descente de la charge (flexion du tronc). Dans le cadre de la journée expérimentale, cette tâche de manutention a été réalisée avec des charges de 5 et 15 kg et deux niveaux d'assistance, adaptés ou non-adaptés aux charges manipulées.

Lors de cette tâche de manutention durant les séances d'entraînement, le niveau d'assistance des exosquelettes a été réglé de façon à être adapté à la masse de la charge manutentionnée (15kg). Pour les deux RAP, le couple d'assistance a été réglé à 72 N.m. Pour le DAP, le niveau d'assistance le plus élevé a été enclenché.

### 2. Tâche MAN-R

Cette tâche de manutention reprend le même principe que la tâche MAN-S. une plateforme haute était cependant située à droite de l'opérateur, de façon à imposer une rotation du tronc de 90° sur l'axe longitudinal.

### 3. Tâche FLE

Cette tâche consistait pour les opérateurs à maintenir une charge à hauteur des chevilles ou des genoux deux fois durant 10 secondes tout en gardant une légère flexion des genoux.

#### 4. Parcours

Cette partie de la phase d'apprentissage a été conçue dans le but de diversifier les apprentissages moteurs des participants avec les exosquelettes. Le parcours débutait par l'enchaînement de deux squats et se divisait ensuite en trois tâches successives (*Figure 17*). La première consistait à emboîter des formes dans les emplacements correspondants situés au sol en maintenant une posture statique « stoop ». La deuxième consistait à placer, un par un, trois boulons autour de trois tiges métalliques différentes situées au sol en technique « stoop ». Les participants avaient pour consigne de se relever après avoir placé un boulon pour prendre le suivant, et ainsi de suite. La dernière tâche consistait à déplacer trois charges (5kg, 10kg et 15kg) d'un support situé à la mi-hauteur de la jambe sur leur gauche, au sol, à droite de leur pied droit. Les participants avaient pour consigne de se relever pour se déplacer vers la charge suivante.

Les participants devaient ensuite refaire deux squats puis le parcours pour enlever les formes des emplacements, les boulons des tiges et remettre les charges sur le support selon les consignes décrites.



*Figure 17 : Illustration du parcours.*

ETUDE EXPLORATOIRE DU PROCESSUS DE FAMILIARISATION A L'USAGE  
D'EXOSQUELETES ASSISTANT LE DOS :

CARACTERISATION DES DETERMINANTS MOTEURS ET BIOMECHANIQUES.

Thevenot Clément

UNIVERSITE DE LORRAINE

AOUT 2021

TMS, Lombalgies, Exosquelettes, Apprentissages moteurs, Familiarisation.

Très peu de données sont disponibles quant à une durée d'entraînement à l'utilisation d'exosquelettes d'assistance du dos avant leur évaluation. Or, les apprentissages moteurs liés à cette phase pourraient s'avérer indispensables en amont de toute évaluation, au regret de n'évaluer que des effets transitoires. Les objectifs principaux de cette étude étaient de déterminer si l'entraînement à l'usage de ces technologies permettait d'observer un stade de familiarisation et de déterminer quels paramètres étaient pertinents dans son évaluation. Sept hommes et sept femmes se sont portés volontaires pour participer à cinq séances d'entraînement, dans lesquelles ils devaient réaliser trois tâches évaluatives impliquant la flexion/extension du tronc avec trois exosquelettes d'assistance du dos. Pour une tâche, la performance a évolué de manière significative ( $p < 0,05$ ) et s'est stabilisée avant la dernière séance pour les trois exosquelettes. Pour une autre tâche, l'amplitude articulaire du genou en flexion/extension a diminué de manière significative ( $p < 0,01$ ) à partir de la troisième séance et s'est ensuite stabilisée quel que soit l'exosquelette utilisé. Il apparaît donc que certains paramètres permettent d'objectiver un stade de familiarisation au cours d'une phase d'entraînement. Ainsi, ne pas intégrer d'entraînement au protocole expérimental, préalablement à l'évaluation de l'utilisation d'exosquelettes, revient à évaluer uniquement des effets transitoires et non les adaptations motrices induites par ces technologies. En entreprise, il apparaît donc nécessaire d'avoir un temps d'apprentissage aux exosquelettes avant de les utiliser en conditions réelles de travail.

WMSDs, Low back pain, Exoskeletons, Motor learning, Familiarization.

Few data are available on the duration of task training and the use of the exoskeleton prior the evaluation. However, the motor learning associated with this period could prove to be essential upstream of any evaluation. Unfortunately, we would risk only evaluating the transient effects associated with their use. This study aimed to determine whether training to the use of these technologies allowed to observe a stage of familiarization and to determine which parameters were most relevant in its evaluation. Seven men and seven women volunteered to participate in five training sessions, in which they had to perform three assessment tasks involving trunk flexion / extension with three back support exoskeletons. For one task, performance changed significantly ( $p < 0.05$ ) and stabilized before the last session for all exoskeletons. For another task, the knee range of motion in flexion / extension decreased significantly ( $p < 0.01$ ) from the third session and then stabilized regardless of the exoskeleton used. It therefore appears that some parameters make it possible to objectify a stage of familiarization during a training phase. Thus, not including training in the experimental protocol, prior to evaluating the use of exoskeletons, amounts to evaluating only transient effects and not the motor adaptations induced by these technologies. In company, it therefore appears necessary to have a learning time with exoskeletons before using them in place in real working conditions.