Reproduction interdite

51èmes Rencontres du GP'Sup – 09 juin 2022

NE PAS REPRODUIRE

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention des TMS

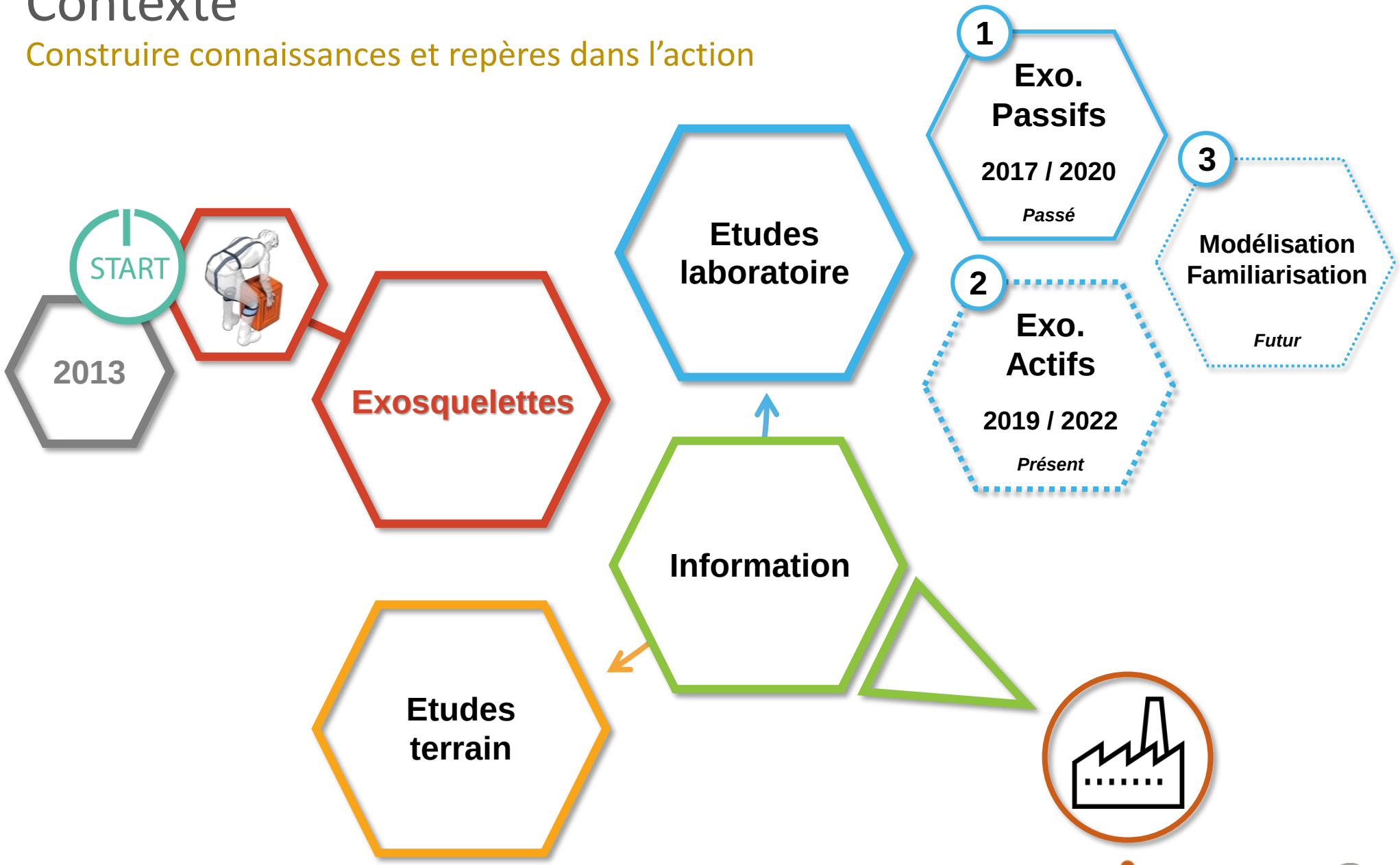
Kévin DESBROSSES
Département Homme au Travail
Laboratoire Physiologie Mouvement Travail

Our job:
making yours safer

www.inrs.fr

Contexte

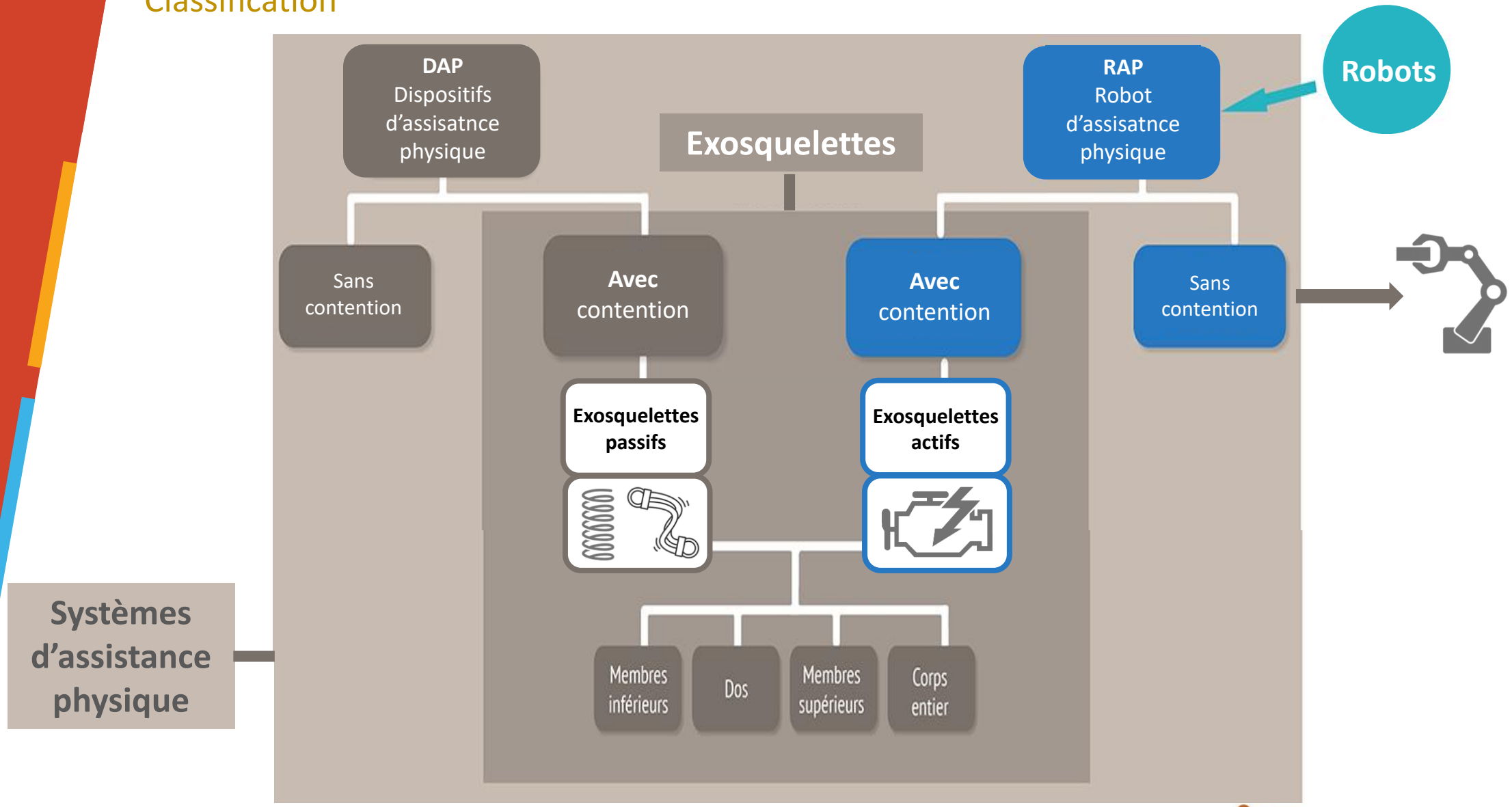
Construire connaissances et repères dans l'action



Exosquelettes ?

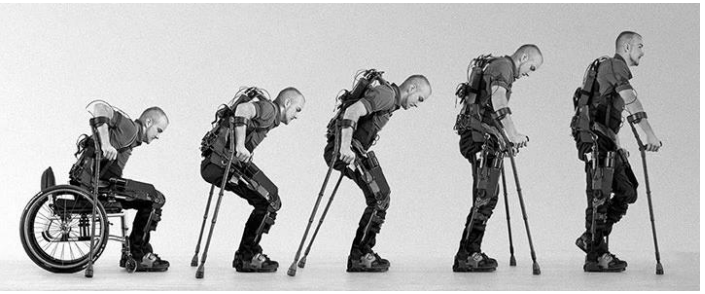
Exosquelettes…

Classification



Exosquelettes…

Applications



Médical

Mobilité

Viteckova et al., 2013

Militaire

Port de charges

Gregorczyk et al., 2010
Mudie et al., 2018

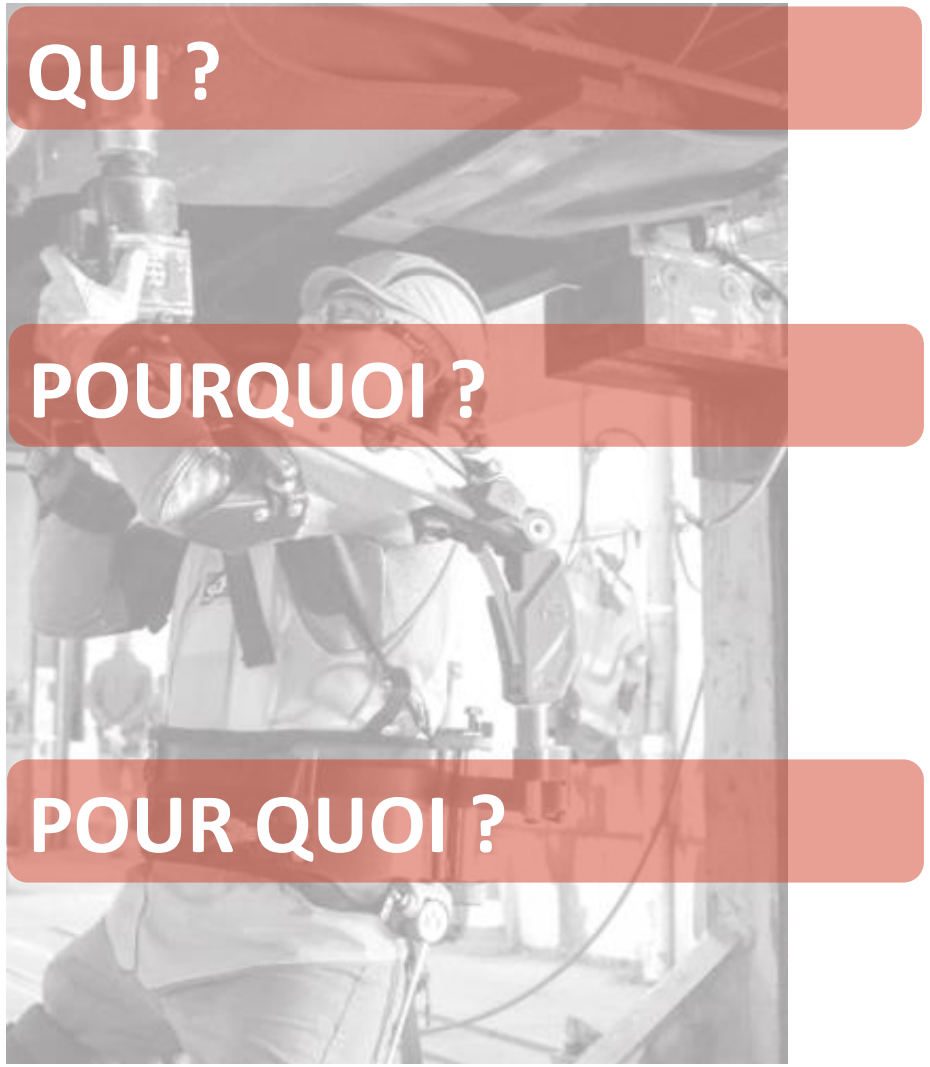
Industriel

Charge physique de travail

De Looze et al., 2016
Theurel & Desbrosses, 2019

Exosquelettes professionnels…

Qui ? Pourquoi ? Pour quoi ?



Entreprises de toutes tailles, tous secteurs

Charge physique
Prévention TMS

de Looze et al., 2016

Pas d'aménagement
Pas d'automatisation

Fox & Kotbella, 2018; Gibbs, 2016

Manutention

Graham et al., 2009
Theurel et al., 2018
…

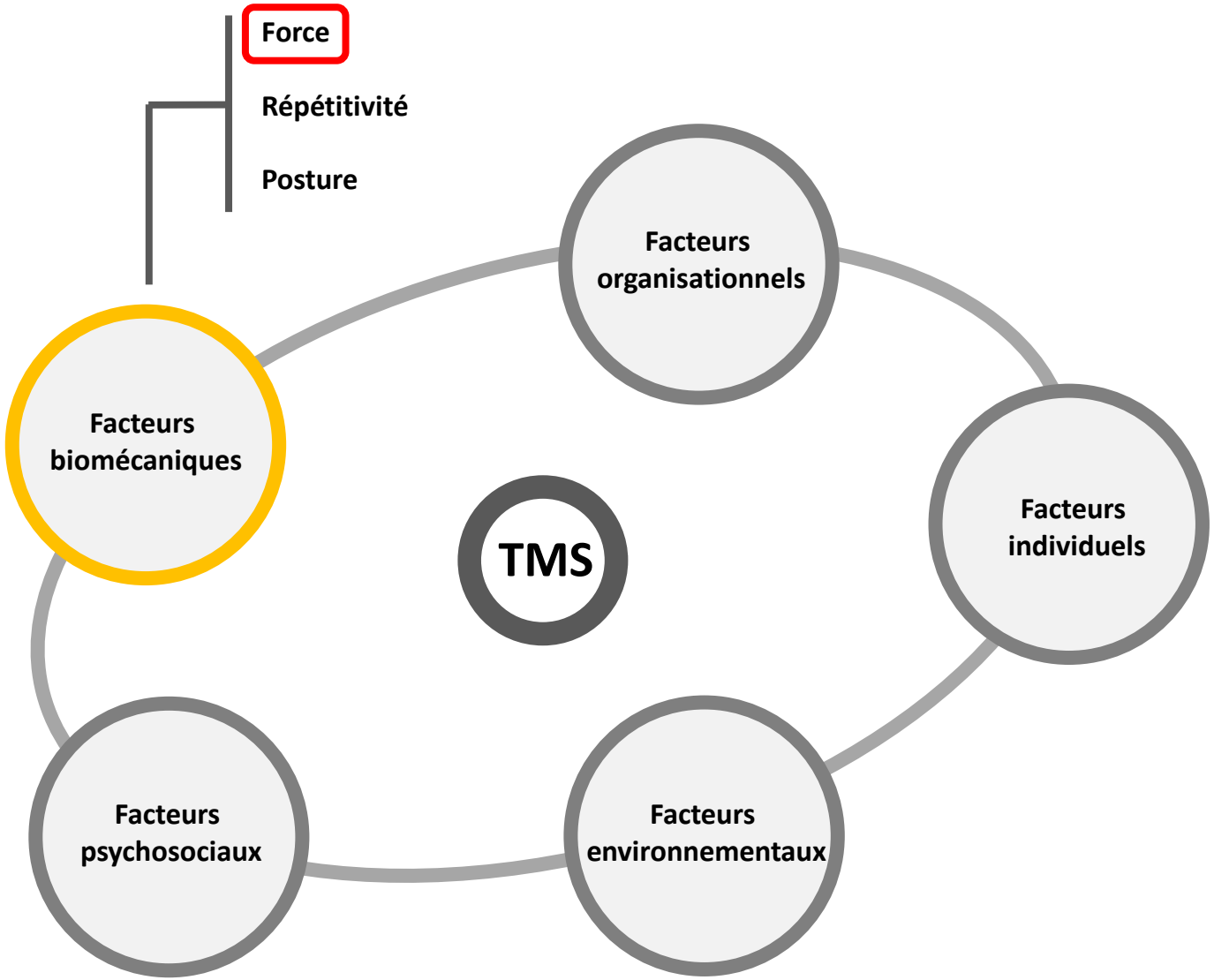
Postures contraignates

Urley & Fathallah 2013
Bosh et al., 2016
…

Exosquelettes et TMS

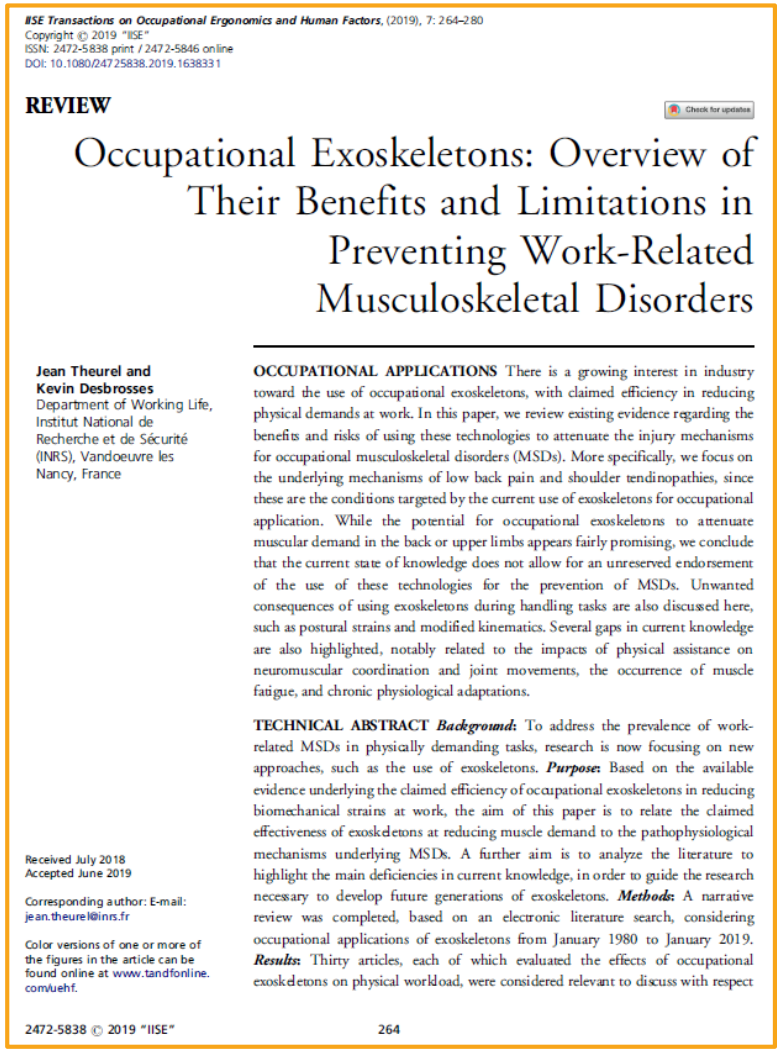
TMS

Facteurs de risques



Exosquelettes professionnels et TMS

Revue de la littérature



IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, (2019), 7: 264–280
Copyright © 2019 "IISE"
ISSN: 2472-5838 print / 2472-5846 online
DOI: 10.1080/24725838.2019.1638331

REVIEW

Occupational Exoskeletons: Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders

Jean Theurel and Kevin Desbrosses
Department of Working Life, Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), Vandoeuvre les Nancy, France

OCCUPATIONAL APPLICATIONS There is a growing interest in industry toward the use of occupational exoskeletons, with claimed efficiency in reducing physical demands at work. In this paper, we review existing evidence regarding the benefits and risks of using these technologies to attenuate the injury mechanisms for occupational musculoskeletal disorders (MSDs). More specifically, we focus on the underlying mechanisms of low back pain and shoulder tendinopathies, since these are the conditions targeted by the current use of exoskeletons for occupational application. While the potential for occupational exoskeletons to attenuate muscular demand in the back or upper limbs appears fairly promising, we conclude that the current state of knowledge does not allow for an unreserved endorsement of the use of these technologies for the prevention of MSDs. Unwanted consequences of using exoskeletons during handling tasks are also discussed here, such as postural strains and modified kinematics. Several gaps in current knowledge are also highlighted, notably related to the impacts of physical assistance on neuromuscular coordination and joint movements, the occurrence of muscle fatigue, and chronic physiological adaptations.

TECHNICAL ABSTRACT ***Background:*** To address the prevalence of work-related MSDs in physically demanding tasks, research is now focusing on new approaches, such as the use of exoskeletons. ***Purpose:*** Based on the available evidence underlying the claimed efficiency of occupational exoskeletons in reducing biomechanical strains at work, the aim of this paper is to relate the claimed effectiveness of exoskeletons at reducing muscle demand to the pathophysiological mechanisms underlying MSDs. A further aim is to analyze the literature to highlight the main deficiencies in current knowledge, in order to guide the research necessary to develop future generations of exoskeletons. ***Methods:*** A narrative review was completed, based on an electronic literature search, considering occupational applications of exoskeletons from January 1980 to January 2019. ***Results:*** Thirty articles, each of which evaluated the effects of occupational exoskeletons on physical workload, were considered relevant to discuss with respect

Received July 2018
Accepted June 2019

Corresponding author: E-mail: jean.theurel@inrs.fr

Color versions of one or more of the figures in the article can be found online at www.tandfonline.com/uehf.

Theurel & Desbrosses, 2019

Exosquelettes professionnels et TMS

Revue de la littérature

Lombalgies

TMS
Epaules

Eurofound, 2012

Exosquelettes professionnels et TMS

Revue de la littérature

22 études

20 | 2 | 5

8 études

8 | 0 | 1

30 études

Lombalgies

Facteurs de risque

Efforts musculaires

Burock & Sorock, 1997
Dreistatdt et al., 2016

Fatigue musculaire

Hoogendoorn et al., 2002

Contraintes colonne

Burock & Sorock, 1997
Cholewicki & Mc Gil, 1996

Effort perçu

Reenen et al., 2008
Clarke & Harris, 2004

Exosquelettes dos

Bénéfices et limites

Consensus

- 10-44 % manutentions dynamiques
- 57 % postures statiques

De looze et al., 2016
Koopman et al., 2019

Masse ?

Abdoli & Stevenson 2006

Conception / Assistance ?

Frost et al., 2019

Tâche / Posture ?

Koopman et al., 2019

Sans consensus

Laboratoire

Bosch et al., 2016
Lotz et al., 2009
Godwin et al.,2009

Terrain

Dewi & Komatsuzaki, 2018

Tâches < 2h00 !

Consensus

Réduction des forces de compression

Abdoli et al., 2006
Graham et al., 2009
Urley & Fattallah, 2013

→ ⊖ rotation & flexion latéral du tronc

Graham et al., 2011 – Abdoli & Stevenson 2018

Consensus

Passif & Actif

Statique
Dynamique

Balstruch et al., 2018
Bosh et al., 2016
Hyusamen et al., 2018 …

Exosquelettes membres supérieurs

Bénéfices et limites

TMS épaule

Facteurs de risque

Efforts musculaires

Cote & Bennet, 2010
Marras et al., 2006
Stauber, 2004

Effort perçu

Coordination / cinématique

Conflit sous-acromial ?

Bey et al., 2007
Hebert et al., 2002

Lombalgies

Facteurs de risque

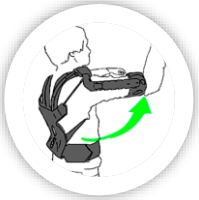
Efforts musculaires dos

Burock & Sorock, 1997
Dreistatdt et al., 2016

Consensus

- activité du deltoïde antérieur
- effort local perçu

Masse ?
Rasheidi et al, 2014

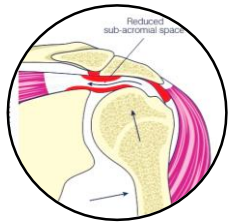


OHW
Hysusamen et al., 2018
Rasheidi et al, 2014
Kim et al., 2018
…

Levage
Theurel et al., 2018

Conception ?
Alabadulkarim & Nussbaum, 2019

Questions ?



Activité des muscles antagonistes
Theurel et al., 2018

≠ entre les muscles fléchisseurs de l'épaule
Rasheidi et al., 2014

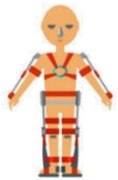
Muscles coiffe des rotateurs ?
Cinématique de l'articulation?

Sans consensus

Activité des muscles posturaux
Weston et al., 2018
Rasheidi et al., 2014
Theurel et al., 2018

Θ Sans effet
Hyusamen et al., 2018

Contraintes colonne
Kim et al., 2018



Conception ?
Masse & équilibre ?
Alabadulkarim & Nussbaum, 2019

Dynamique vs. statique ?
Bouisset et al., 2000

Exosquelettes professionnels et TMS

Revue de la littérature : synthèse

Exosquelettes DOS

Réduction efforts musculaires et contraintes colonne

Adéquation entre les **demandes** de la tâche (posture et charge) et la **conception** de l'exosquelette

Exosquelettes Mb. Sup.

Réduction efforts musculaires

Conflit sous-acromial ?
Coordination musculaire ?
Cinématique ?

En pratique

Assistance spécifique

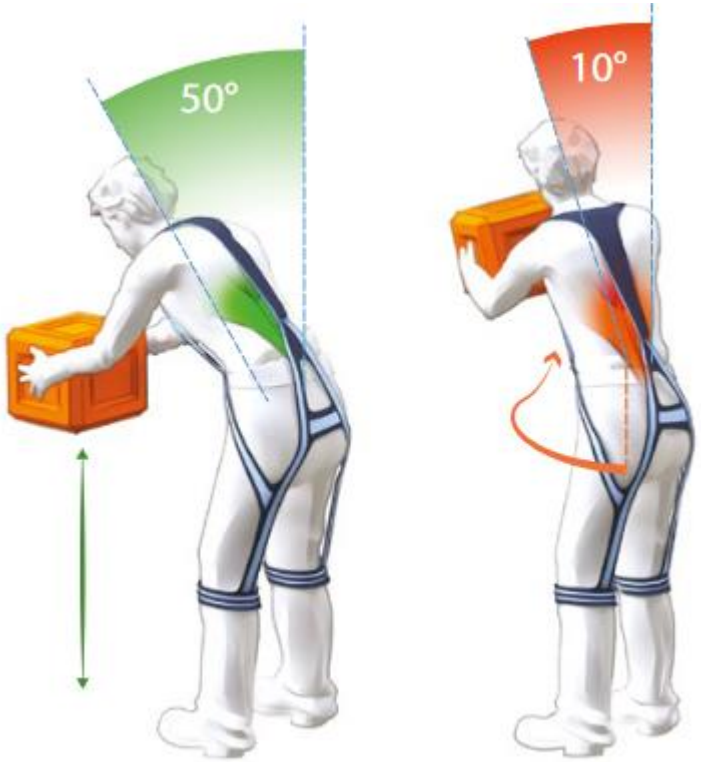
Evaluation de l'interaction : "exosquelette – humain – tâche"
En situation réelle

Bénéfices

Limites

Etudes laboratoire INRS

Exosquelettes passifs DOS



International Journal of *Environmental Research and Public Health*

MDPI

Article

Effectiveness of Soft versus Rigid Back-Support Exoskeletons during a Lifting Task

Mathilde Schwartz [1,2], Jean Theurel [1] and Kévin Desbrosses [1,*]

[1] Working Life Department, French National Research and Safety Institute for the Prevention of Occupational Accidents and Diseases (INRS), 54500 Vandœuvre-les-Nancy, France; mathilde.schwartz@inrs.fr (M.S.); jean.theurel@inrs.fr (J.T.)
[2] Développement, Adaptation & Handicap (DevAH), University of Lorraine, 54000 Nancy, France
* Correspondence: kevin.desbrosses@inrs.fr; Tel.: +33-38-350-9893

Abstract: This study investigated the influence of passive back-support exoskeletons (EXO_{BK}) design, trunk sagittal inclination (TSI), and gender on the effectiveness of an exoskeleton to limit erector spinae muscle (ES) activation during a sagittal lifting/lowering task. Twenty-nine volunteers performed an experimental dynamic task with two exoskeletons (two different designs: soft (SUIT) and rigid (SKEL)), and without equipment (FREE). The ES activity was analyzed for eight parts of TSI, each corresponding to 25% of the range of motion (lifting: P1 to P4; lowering: P5 to P8). The impact of EXO_{BK} on ES activity depended on the interaction between exoskeleton design and TSI. With SKEL, ES muscle activity significantly increased for P8 (+36.8%) and tended to decrease for P3 (−7.2%, $p = 0.06$), compared to FREE. SUIT resulted in lower ES muscle activity for P2 (−9.6%), P3 (−8.7%, $p = 0.06$), and P7 (−11.1%), in comparison with FREE. Gender did not influence the effect of either back-support exoskeletons on ES muscle activity. These results point to the need for particular attention with regard to (1) exoskeleton design (rigid versus soft) and to (2) the range of trunk motion, when selecting an EXO_{BK}. In practice, the choice of a passive back-support exoskeleton, between rigid and soft design, requires an evaluation of human-exoskeleton interaction in real task conditions. The characterization of trunk kinematics and ranges of motion appears essential to identify the benefits and the negative effects to take into account with each exoskeleton design.

Keywords: musculoskeletal disorders; workload; wearable assistive device; occupational back-support exoskeleton; EMG; handling task; low back pain

check for updates

Citation: 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

Academic Editors: Vincenzo Denaro, Sergio Iavicoli, Fabrizio Russo and Gianluca Vadalà

Received: 24 June 2021
Accepted: 27 July 2021
Published: 29 July 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

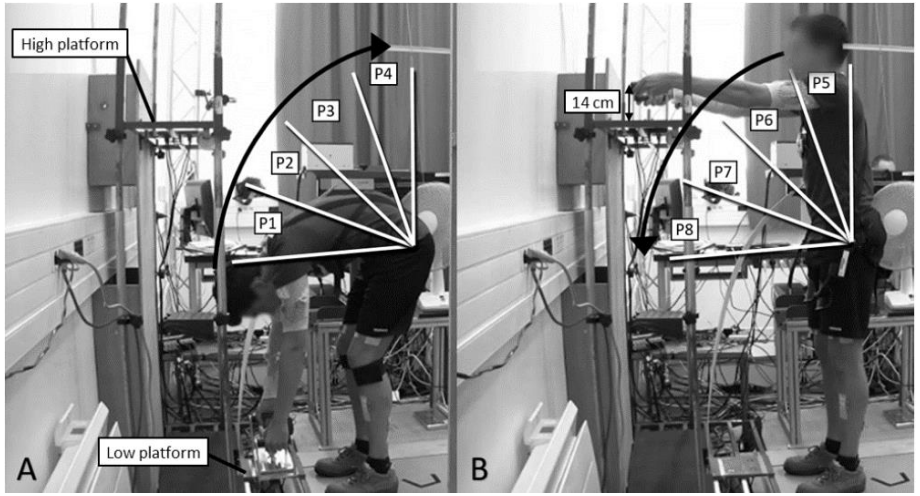
1. Introduction

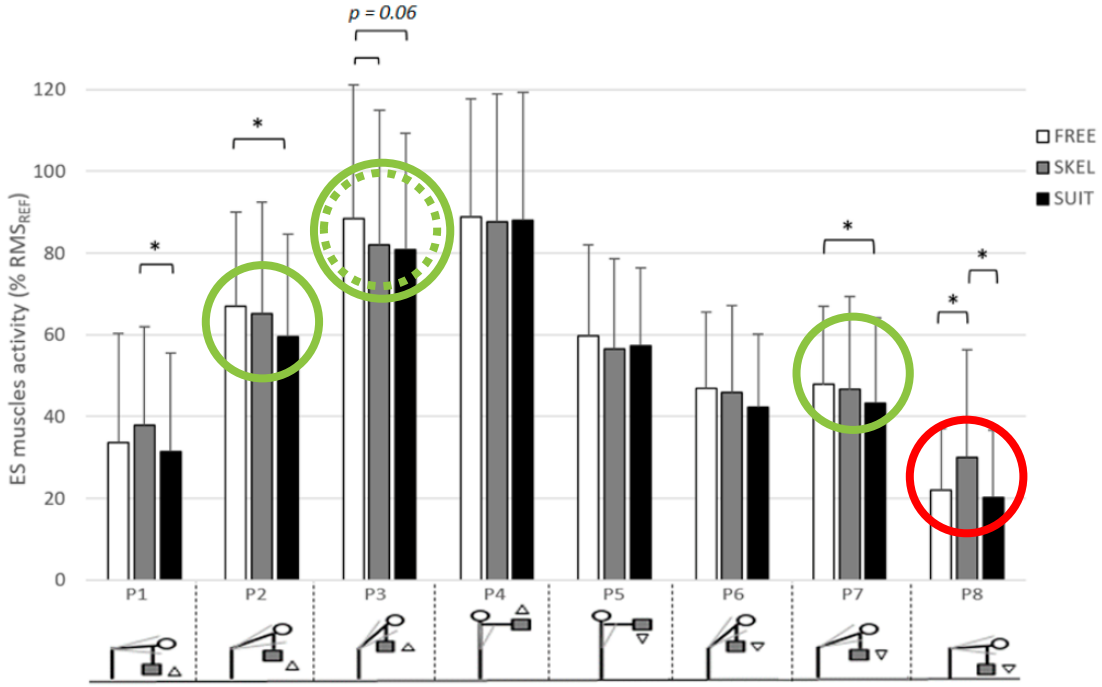
Occupational exoskeletons are wearable devices generally aimed at supporting users in performing their work tasks, by generating appropriate force/torque on one or multiple human joints. There has been increasing interest in employing exoskeletons for workplace ergonomics, particularly with the aim of reducing physical workload [1] and risk of musculoskeletal disorders (MSD) for workers [2]. Among these technologies, back-support exoskeletons (EXO_{BK}) have been specifically designed in view of preventing the occurrence of low back pain (LBP). Much evidence has been reported in the scientific literature about the efficiency of passive EXO_{BK} in relation to limiting lumbar muscular stress during handling operations involving the trunk flexion/extension in the sagittal plane [1–3]. For examples, during laboratory studies, reductions in back muscle activity ranged from −10 to −44% for repetitive lifting [4] and from −10 [5,6] to −57% [7] in static postures. Research carried out in real work conditions has also revealed significant reductions (−20 to −25%) in spinal muscle activity when using a passive EXO_{BK} [8]. The recent systematic review on industrial back-support exoskeletons [3] evaluated a mean reduction in erector spinae muscles activity of −18% during lifting and −36% during static bending for passive EXO_{BK}.

However, considerable disparities in the protocols of previous studies—including exoskeleton designs (e.g., flexible (soft) versus stiff (rigid) components), postures adopted

Schwartz & al, 2021

Exosquelettes passifs DOS





Exosquelettes passifs Mb. Sup.

European Journal of Applied Physiology
https://doi.org/10.1007/s00421-021-04747-9

ORIGINAL ARTICLE

Evaluation of two upper-limb exoskeletons during overhead work: influence of exoskeleton design and load on muscular adaptations and balance regulation

K. Desbrosses[1] · M. Schwartz[1] · J. Theurel[1]

Received: 30 November 2020 / Accepted: 12 June 2021
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2021

Abstract

Purpose Overhead works (OHW) are identified as a major risk factor for shoulder musculoskeletal disorders. The use of upper-limb exoskeletons (EXO_{UL}) is emerging to address these challenges. This research tested the influence of EXO_{UL} design and load on the upper-limb and postural muscles activity, and on the balance control, during OHW.

Methods This study compared two passive EXO_{UL}, notably differing by the level of assistive torque delivered. Both EXO_{UL} was examined in two load conditions (2 vs. 8 kg). Twenty-nine volunteers performed a static OHW for each condition.

Results Both EXO_{UL} led to similar reductions in shoulder flexor muscle activity ($12.3 \pm 7.8\%$ of RMS_{REF}), compared to without equipment ($29.0 \pm 14.2\%$ RMS_{REF}). Both EXO_{UL} resulted in a reduction in the activity of shoulder ($3.6 \pm 3.2\%$ RMS_{REF}) and wrist ($2.4 \pm 1.7\%$ RMS_{REF}) extensor muscles (4.9 ± 3.9 and $5.9 \pm 6.1\%$ RMS_{REF}, respectively). The use of EXO_{UL} led to reductions in back muscle activity, depending on the exoskeleton design (in % RMS_{REF}, 12.9 ± 9.4 for EXO1, 22.8 ± 12.6 for EXO2 and 32.0 ± 18.4 without equipment). Wearing EXO_{UL} induced changes in balance regulation, depending on both exoskeleton design and load condition.

Conclusion The increase of assistive torque was not associated with an increase in EXO_{UL} performance. However, the exoskeleton design (mass, balance, and assistive torque) has to be suitable for the load handled during static OHW to optimize the effects of using an EXO_{UL} on the postural muscles.

Keywords Musculoskeletal disorders · Workload · Wearable assistive devices · EMG

Abbreviations

AD	Anterior deltoid muscle
BB	Biceps brachii muscle
CoP	Center of pressure
EMG	Electromyography
ES	Erector spinae muscle
EXO_{UL}	Upper limb exoskeleton
EXO1	EXHAUSS Stronger® exoskeleton (EXHAUSS, France)
EXO2	SKEL-EX V1 exoskeleton (SKEL-EX, Netherlands)
FC	Flexor carpi radialis muscle
FREE	Without equipment
MSD	Musculoskeletal disorders
OHW	Overhead works
RMS	Root mean square
RMS_{REF}	RMS value used as the reference value
TA	Tibialis anterior muscle
TB	Triceps brachii muscle
TS	Trapezius muscle (superior head)
EC	Extensor carpi radialis muscle
UL	Upper limb
VL	Vastus lateralis muscle

Communicated by Andrew Cresswell.

✉ J. Theurel
jean.theurel@inrs.fr

[1] Working Life Department, French National Research and Safety Institute for the Prevention of Occupational Accidents and Diseases (INRS), 1 rue du Morvan, 54500 Vandœuvre-les-Nancy, France

Introduction

Shoulder-related musculoskeletal disorders (MSD) are an important issue in the modern workplace and remain prevalent among workers in the manufacturing and industrial sectors (Grieve and Dickerson 2008; Roquelaure, 2009).

Published online: 25 June 2021

Desbrosses & al, 2021

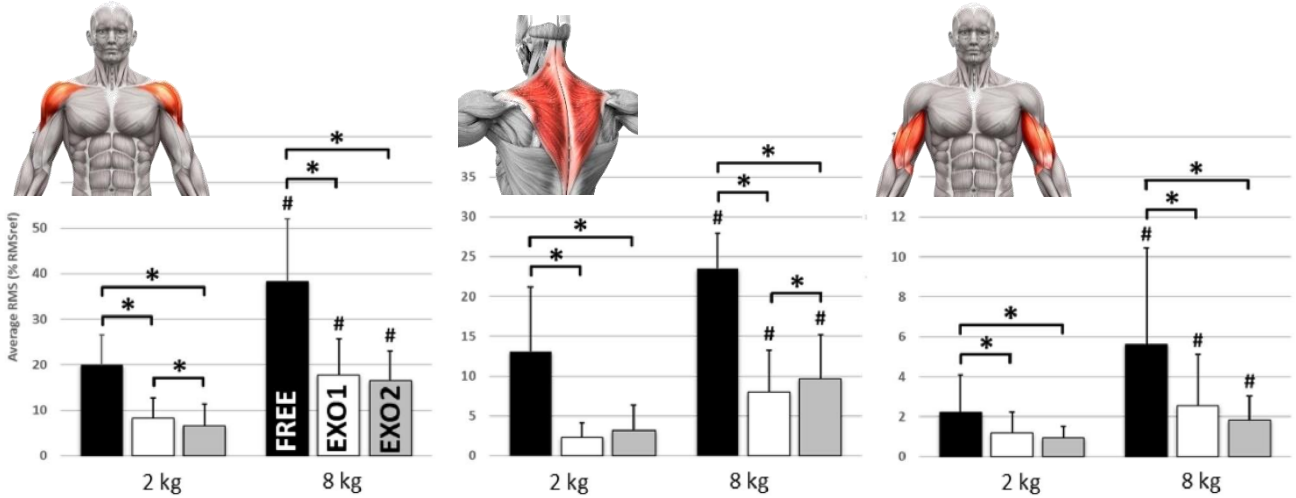
Exosquelettes passifs Mb. Sup.

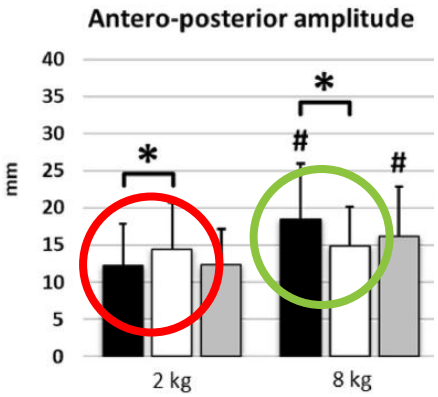
A : *EXO1, EXHAUSS Stronger®*

B : *EXO2, SKEL-EX V1®*

9 kg
12 N.m

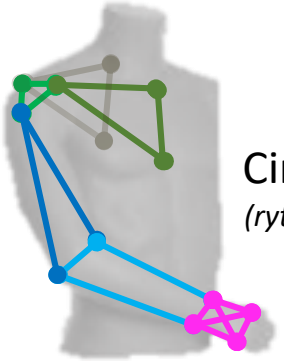
4 kg
6,5 N.m



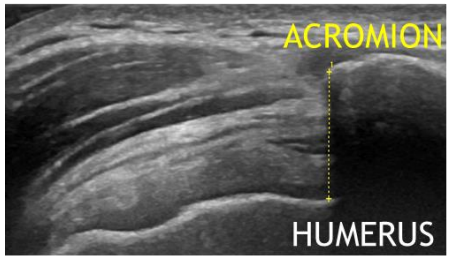


Assistance de l'articulation de l'épaule

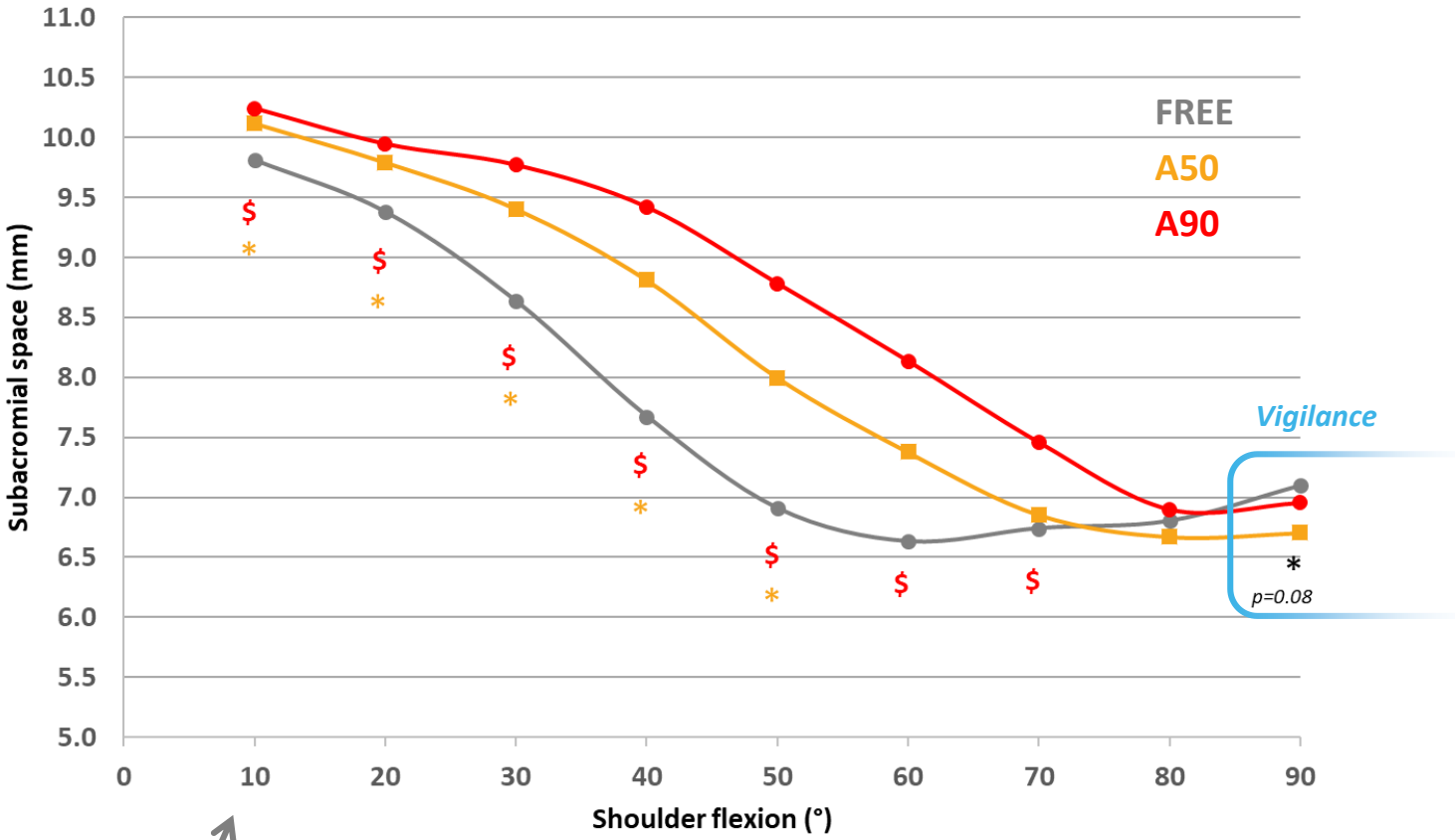
EMG
(agonistes / antagonistes)



Cinématique
(rythme scapulo-humeral)



Espace sous-acromial
(conflit sous-acromial)



p <0.05
*** : FREE ≠ A50**
$: FREE ≠ A90

En cours

Evolution des conceptions… <u>robotisation des exosquelettes</u>

Axis 1 : Adaptations neuromusculaires et cinématiques

Axis 2 : Conséquences cardio-respiratoires

En cours

Axe 2 : Conséquences cardio-respiratoires

1 tâche répétitive

Dynamique Sagittal

5 min
15 cycles/min

10 kg

Contrôle

Back X

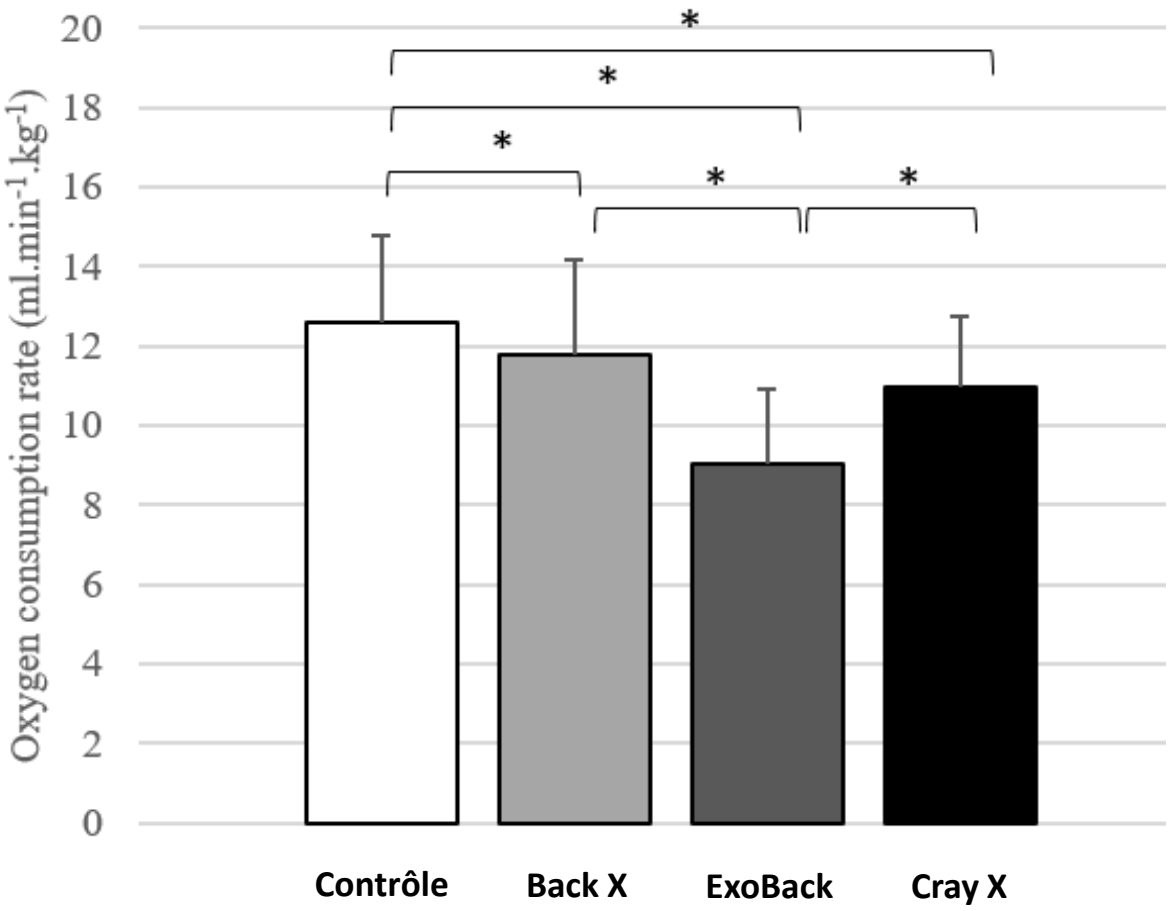
ExoBack

Cray X

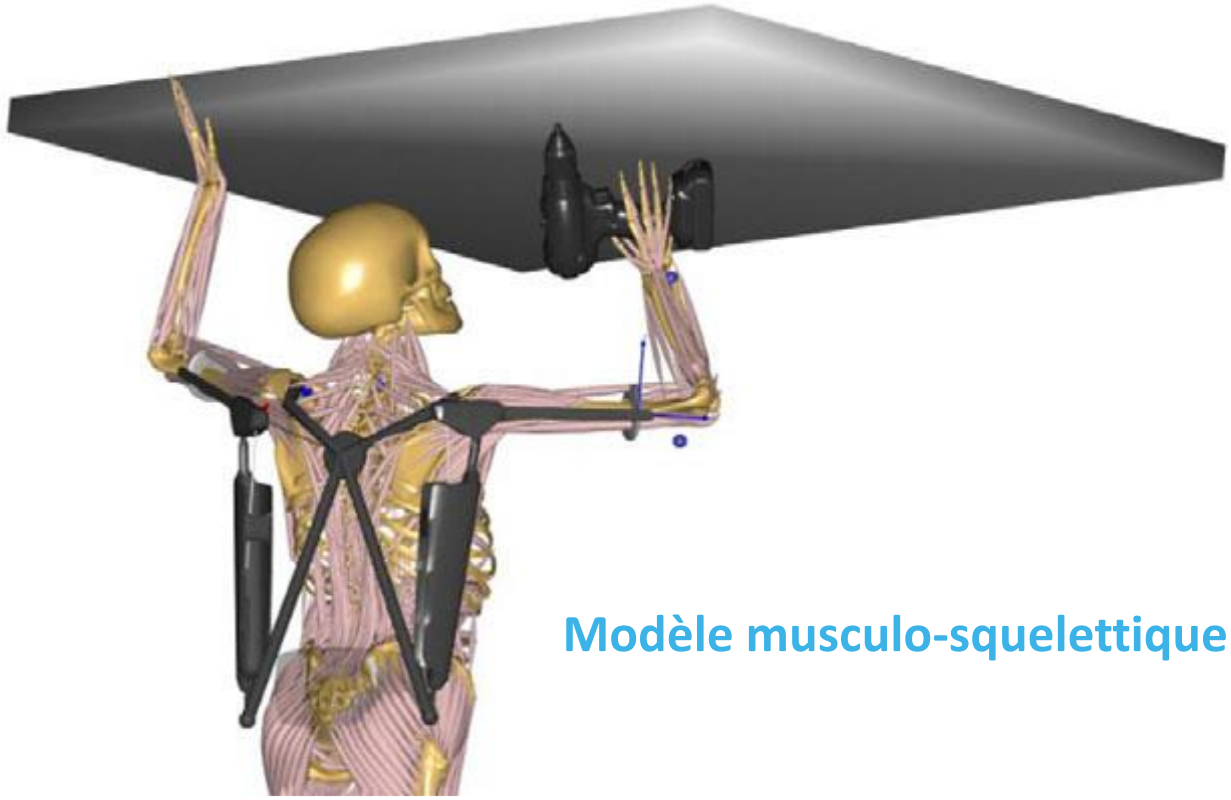
En cours

Axe 2 : Conséquences cardio-respiratoires

Résultats préliminaires

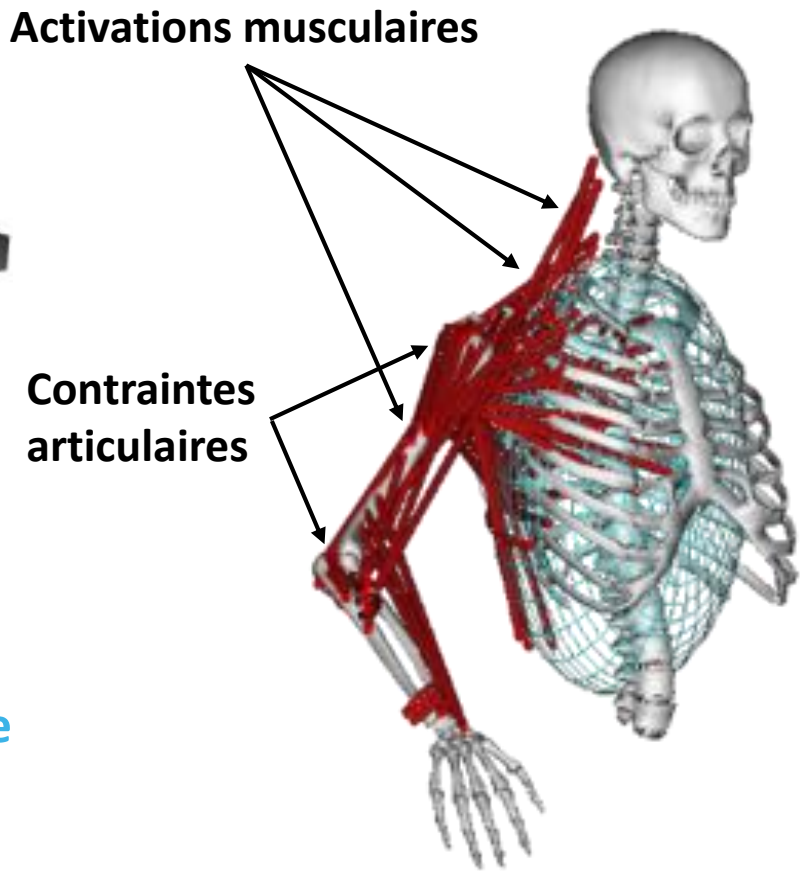


Projet



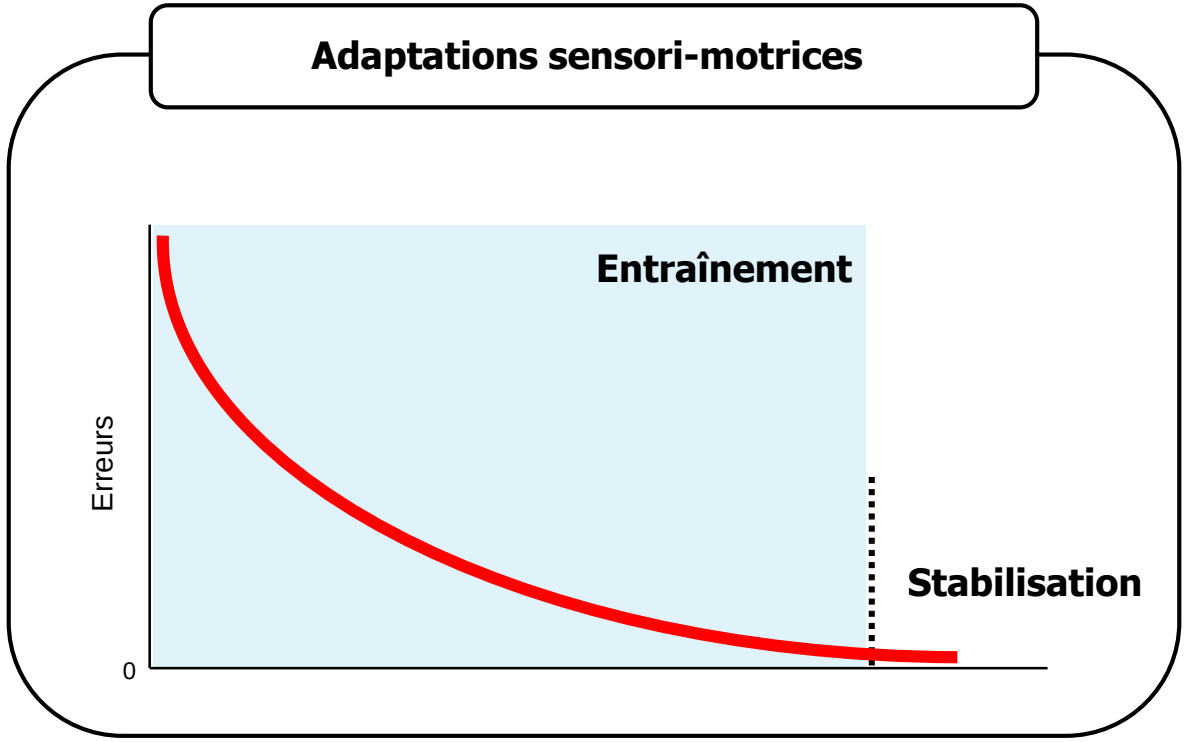
Fritzsche et al. (2021)

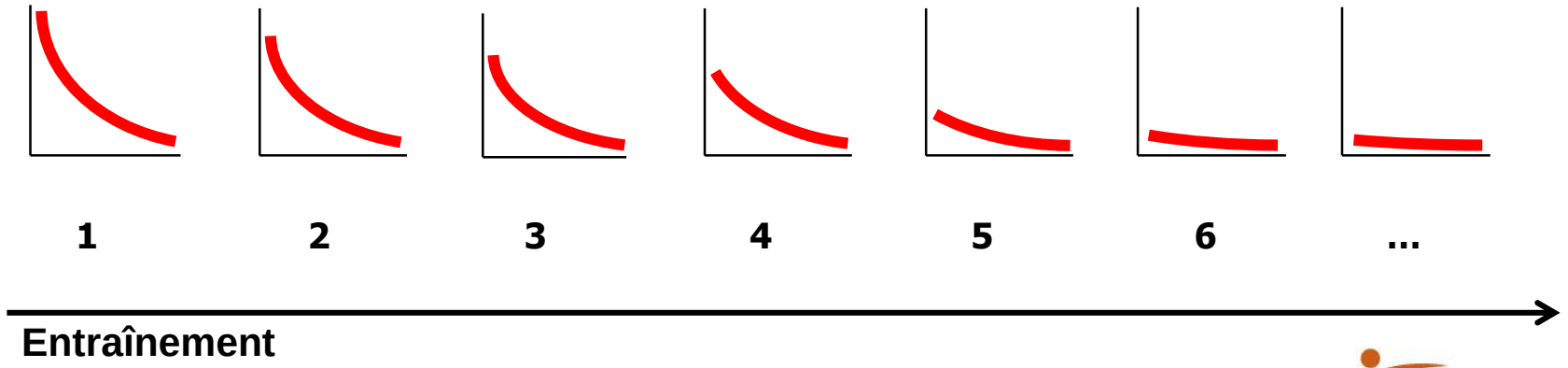
Modèle musculo-squelettique



Projet

Familiarisation





Etudes terrain INRS

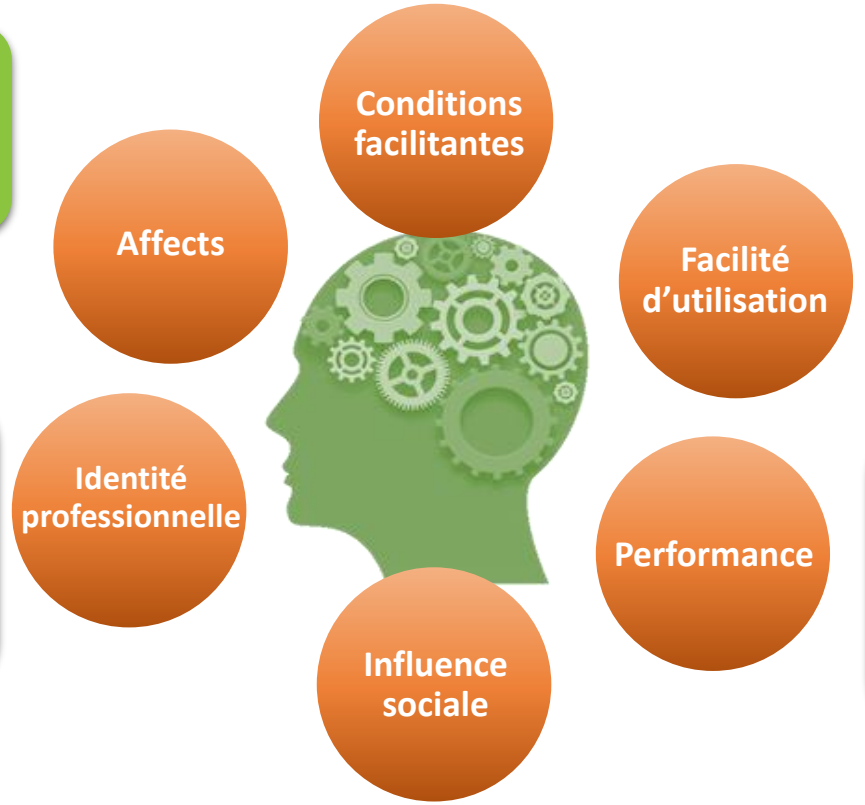
Exosquelettes au travail

Processus d'acceptation

Ce que l'organisation met en place
(informations, formation, procédure, suivi, référent)

Ressenti de l'opérateur
(agréable, aimer travailler avec, confiance, anxiété, nervosité, isolement, enthousiasme)

Utilisation du système & efforts
(apprentissage, réajustement, utilisation, déplacement, gestes, empêché de travailler)



Effets sur la construction de l'identité au travail
(dvt.. nvelles compétences, perte compétences, reconnaitre son travail, valorisation du métier…)

Amélioration de la performance
(efficacité, productivité, qualité, vitesse)

la santé / sécurité au travail
(travailler en sécurité, efforts physiques, fatigue, gênes et douleurs…)

Perception de l'avis des autres
(encadrement, collègues, personnes importantes)

Wioland et al., 2019

Exosquelettes au travail

Processus d'acceptation

Echelle de Lickert

Wioland et al., 2019

Offre d’information INRS

Une offre complète

Décrypter, approfondir, identifier, agir…

ED 6295

NT 62

TC 175

Dossier Web INRS

Webinaire, 2020

Infographie

Rendez-vous de Travail & Sécurité, 2019

Une offre complète

FAQ

Acquisition d'un exosquelette

+ 1. Combien coûte un exosquelette ?
+ 2. Quel est le poids d'un exosquelette ?
+ 3. Quelle est la durée de vie d'un exosquelette et quels sont les besoins de maintenance ?
+ 4. Combien d'exosquelettes sont actuellement disponibles sur le marché? L'offre évolue-t-elle ?

Statut des exosquelettes

+ 7. Les exosquelettes sont-ils des équipements de protection individuelle?
+ 8. Les exosquelettes sont-ils des machines ?
+ 9. Des travaux de normalisation visant à encadrer la conception et l'utilisation d'exosquelettes sont-ils en cours ?

Risques et effets sur la santé

+ 10. Quels sont les principaux points de vigilance lors de l'utilisation d'un exosquelette ?
+ 11. Porter un exosquelette a-t-il des conséquence
+ 12. A-t-on suffisamment de recul sur les effets à l

Environnement et situations de travail

+ 19. Des exemples d'intégrations réussies d'exosquelettes ont-ils été observés ?
+ 20. L'exosquelette est-il adapté au travail en zone Atex (atmosphère explosible) ?
+ 21. Les exosquelettes ont-ils un intérêt dans le cadre du maintien dans -t-il des contre-indications au port d'un exosquelette vis-à-vis gie ou d'un handicap ?

des exosquelettes dédiés aux aides-soignants ? En particulier, s qui semblent pouvoir soulager les salariés exposés aux de charges sont-ils adaptés à la mobilisation des personnes ?

retours d'expérience sur l'intégration d'exosquelette dans le P ?

e vue de l'hygiène alimentaire, les exosquelettes sont-ils cteur de l'agro-alimentaire ?

Performance

+ 15. Le recours aux exosquelettes ne risque-t-il pas d'entrai la durée d'activité ?
+ 16. Dans l'état actuel des connaissances, quels sont les ge un exosquelette apporte le plus de bénéfices ?

Port de charges

+ 17. Avec le recours aux exosquelettes, peut-on envisager d poids des charges manipulées ?
+ 18. Les exosquelettes peuvent-ils aider à porter des objets à 15 kg) ?

Accompagnement et formation des salariés

+ 25. Comment favoriser l'acceptation des exosquelettes ?
+ 26. Combien de temps faut-il pour s'adapter à l'utilisation d'un exosquelette ?
+ 27. Une formation spécifique sur les accidents impliquant un exosquelette est-elle nécessaire pour les Sauveteurs secouristes du travail ? L'INRS propose ou proposera-t-il des formations sur l'utilisation des exosquelettes ?

Organisation

+ 28. L'intégration d'un exosquelette peut-il avoir des conséquences sur les collectifs de travail ?
+ 29. Un exosquelette mis au point pour un salarié est-il utilisable par d'autres salariés ?

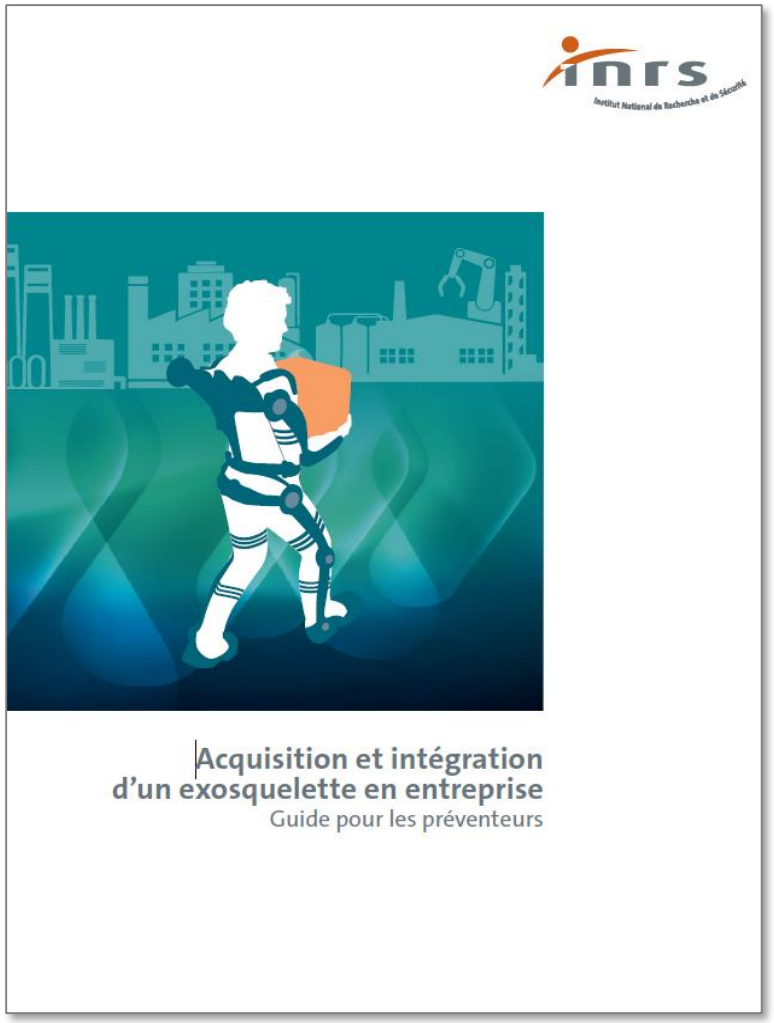
https://www.inrs.fr/risques/exosquelettes/faq.html

Acquisition et intégration

Exosquelettes au travail : comment s’y préparer ?

Acquisition et intégration

Guide pour les préventeurs



ED 6315

PHASE 1	**Aide à la décision**
Étape 1	▶ Analyse de la charge physique de travail et recherche de pistes de prévention Attendus : – Identifier les situations de travail qui peuvent bénéficier de solutions de prévention collectives et organisationnelles – Identifier les tâches qui peuvent bénéficier d'une assistance physique spécifique
Étape 2	▶ Description détaillée des tâches pouvant bénéficier d'une assistance physique spécifique Attendus : – Identifier les caractéristiques spécifiques des tâches sélectionnées
Étape 3	▶ Validation collective des caractéristiques de l'exosquelette Attendus : – Lister des critères objectifs à intégrer au cahier des charges – S'accorder sur l'exosquelette le plus adapté
	Choix d'un exosquelette potentiellement adapté
PHASE 2	**Évaluation de l'interaction homme – exosquelette**
Étape 1	▶ Introduction des critères et des outils d'évaluation Attendus : – Comprendre les critères d'évaluation – Sélectionner des outils d'évaluation
Étape 2	▶ Élaboration du protocole d'évaluation Attendus : – S'inscrire dans un protocole structuré
Étape 3	▶ Apprentissage hors situation réelle de travail Attendus : – Se familiariser avec l'exosquelette et faire l'apprentissage de la tâche et de son environnement – Décider de la poursuite de l'évaluation en situation réelle de travail
Étape 4	▶ Mise en œuvre en situation réelle de travail Attendus : – Faire l'apprentissage approfondi de l'usage de l'exosquelette – Décider de l'intégration définitive, ou non, de l'exosquelette en fonction des résultats de l'évaluation
	Intégration d'un exosquelette effectivement adapté
PHASE 3	**Retour d'expérience**
	Attendus : – Mener des retours d'expérience à court, moyen et long terme sur l'usage de l'exosquelette sur la santé et la sécurité des opérateurs en fonction des évolutions des situations de travail

kevin.desbrosses@inrs.fr

Institut National de Recherche et de Sécurité

Notre métier, rendre le vôtre plus sûr

Merci de votre attention

www.inrs.fr