Colloque IRSST
La manutention : Plus qu'un simple geste
20 novembre 2019
Montréal, Québec

Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des risques professionnels

Equipe pluridisciplinaire pour l'étude des exosquelettes professionnels

EXOSQUELETTES

EXOSQUELETTES ET MANUTENTION

Jean-Jacques ATAIN KOUADIO, Laboratoire EPAP, Département Homme au Travail, INRS

Jean THEUREL, Laboratoire PMT, Département Homme au Travail, INRS

2013 — 2015 — 2016 — 2017 — 2018 — 2019

Prospective

État des lieux

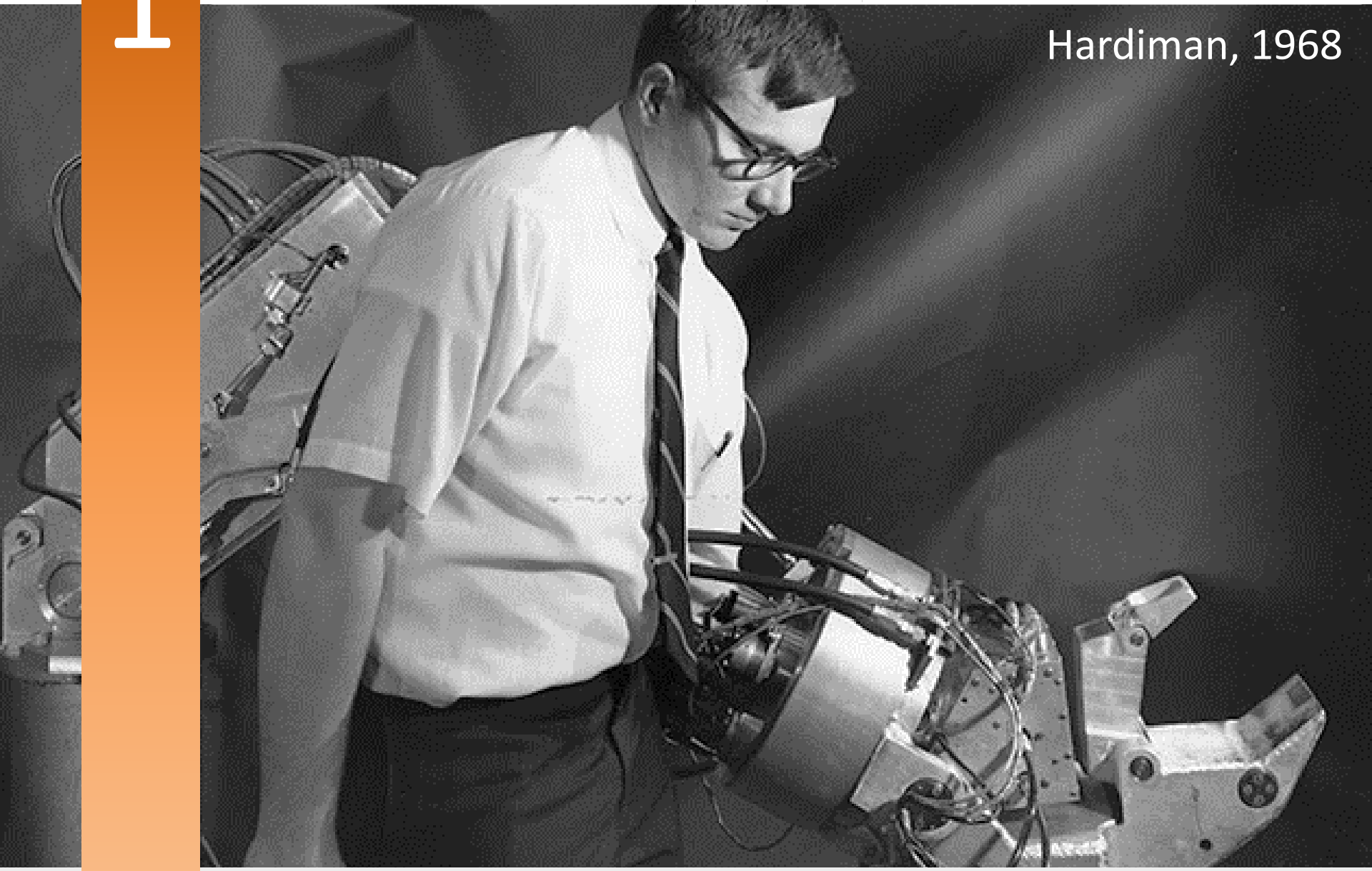
EXO GROUPE

Équipe pluridisciplinaire

Campagne d'information

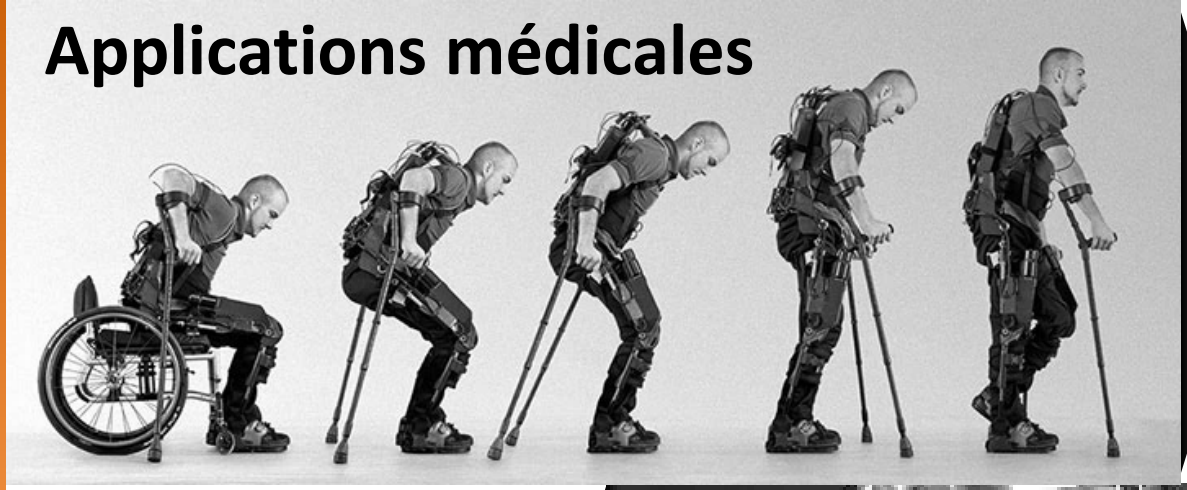
inrs
Institut National de Recherche et de Sécurité

1



CONCEPT

Applications médicales



Mobilité

Viteckova et al., 2013

Augmentation

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

Applications militaires

Applications industrielles

TMS

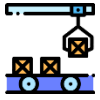
De Looze et al., 2016

Définition

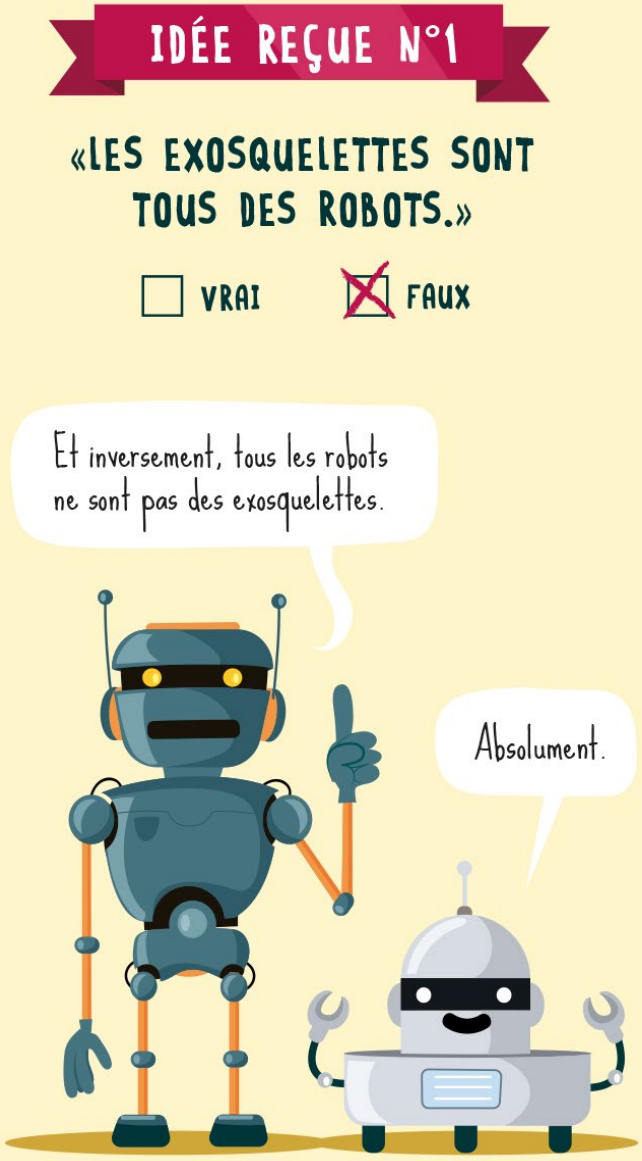
Les exosquelettes sont des robots?

DAP : Dispositif d'assistance physique
RAP : Robot d'assistance physique

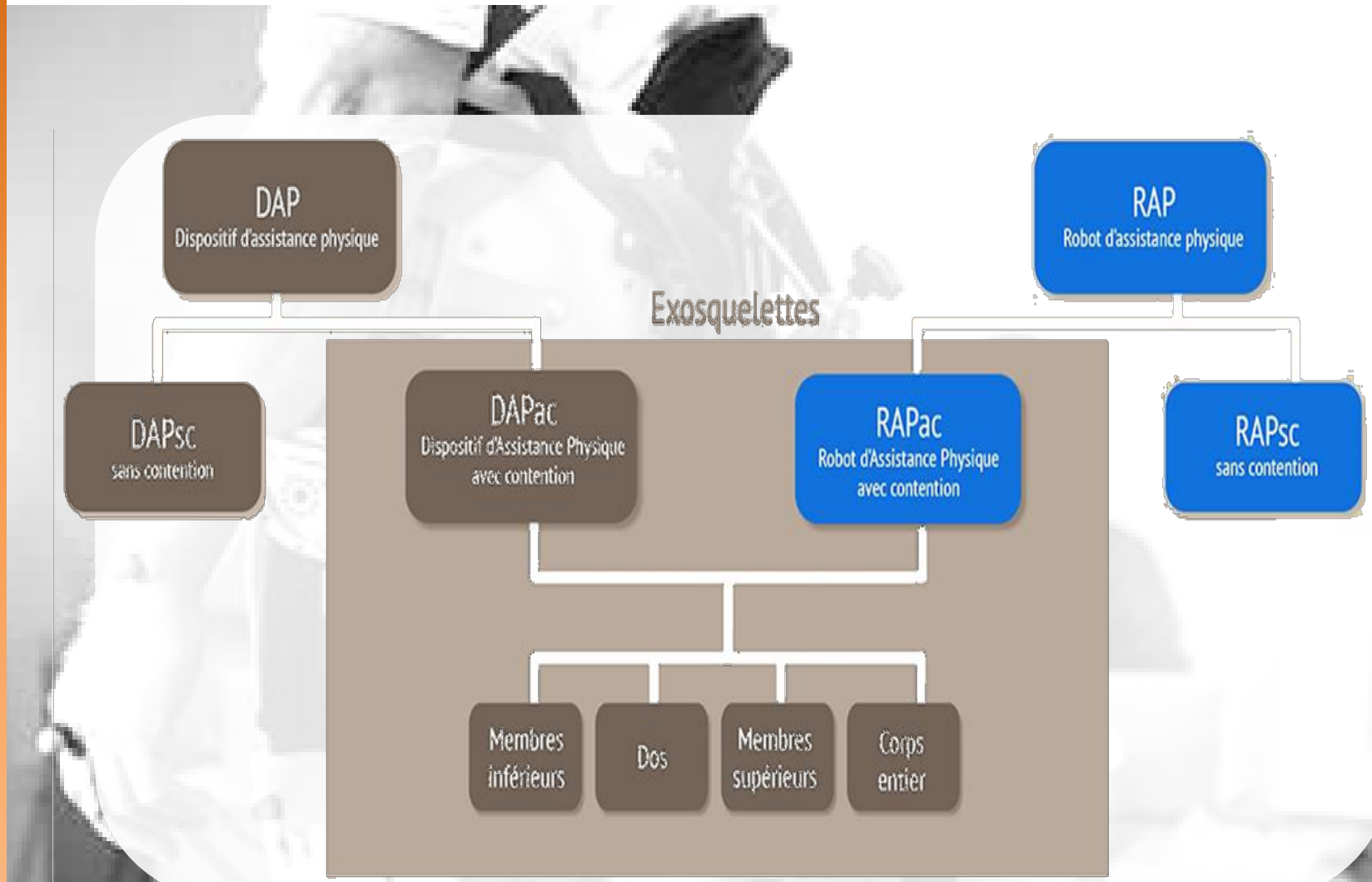
Ils sont portés par l'utilisateur
(à contention / « wearable »)



Ils offrent une aide au mouvement
« assistance physique »



Classification



Veille technologique

Une famille protéiforme

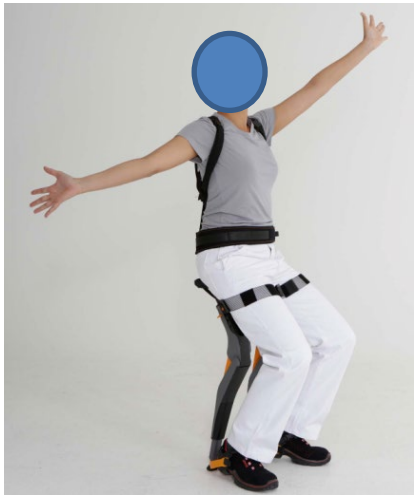
14

24

5

(© RB3D)

(© Deledda)



(© Deledda)

(© Deledda)

2

APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

Qui?

Entreprises de toutes tailles, tous secteurs

Pourquoi?

Charge physique
Prévention TMS

De Looze et al., 2016

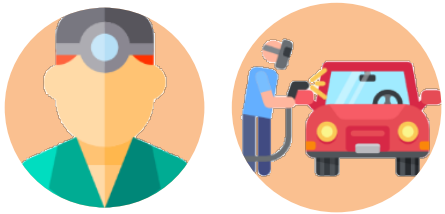
Pas d'aménagement
Pas d'automatisation

Fox et Kotbella, 2018
Gibbs, 2016

Pour quelles tâches?

Manutention

e.g.: Graham et al., 2009
Theurel et al., 2018
....

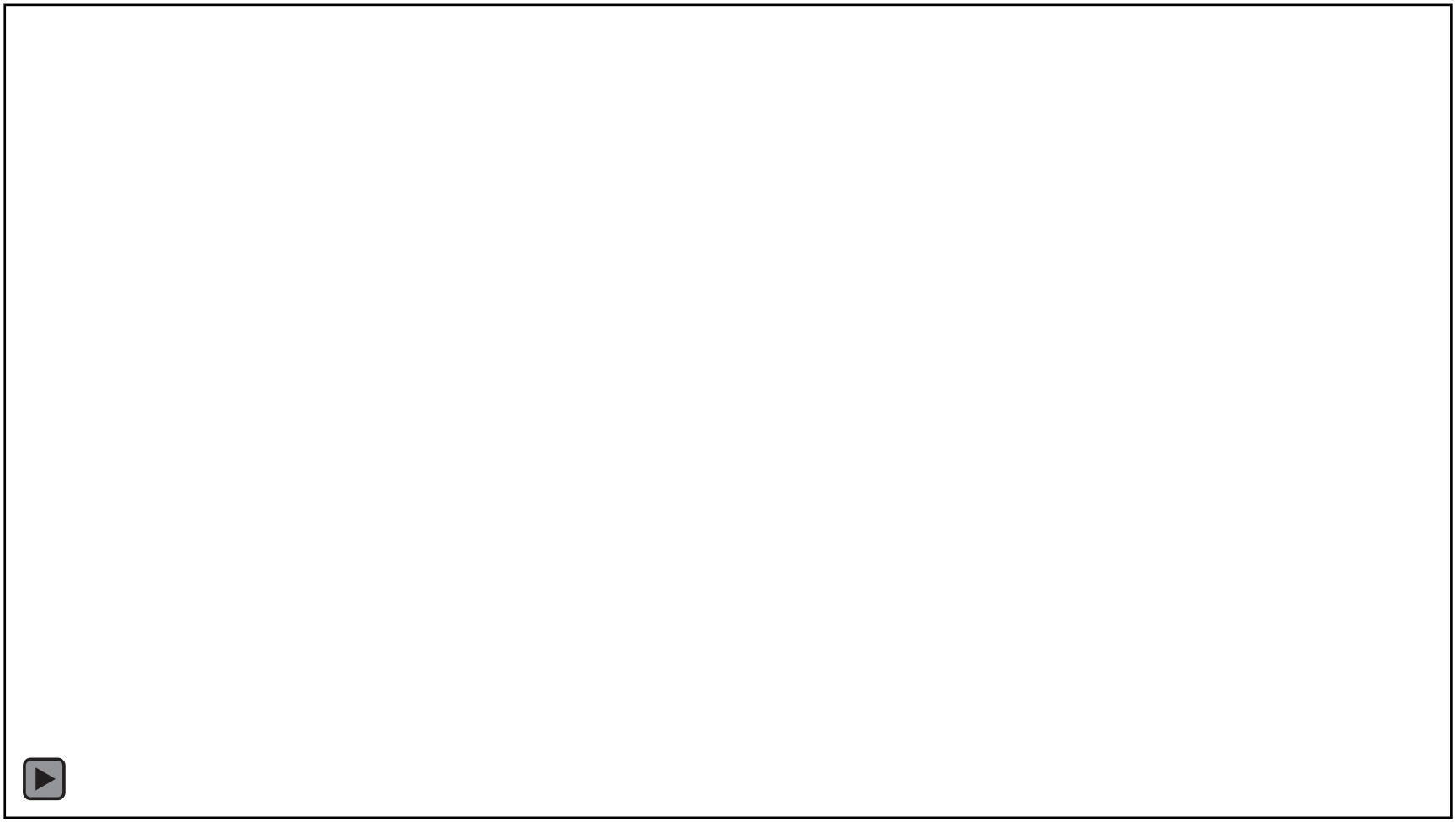


Postures contraignantes

e.g.: Urley & Fathallah 2013
Bosh et al., 2016
...

L’exemple de Luc

Vidéo animation



3

ÉVALUATION, ACCEPTATION ET DÉPLOIEMENT

3.1

ÉVALUATION

« Occupational »
« Work »

« Exoskeleton »
« Assistive Devices »

Jean THEUREL
Chercheur / Physiologiste
INRS

Kevin Desbrosses
Chercheur / Physiologiste
INRS

REVUE DE LITTÉRATURE

22

études

20 2 5

8

études

8 0 1

Lombalgie

Facteurs de risque

Effort des muscles du dos

Burock et Sorock, 1997
Dreistatdt et al., 2016

Fatigue musculaire

Hoogendoorn et al., 2002

Contraintes vertébrales

Burock et Sorock, 1997
Cholewicki et McGil, 1996

Effort perçu

Reenen et al., 2008
Clarke & Harris, 2004

Exosquelette "dos"

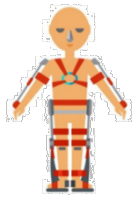
Bénéfices et limites

↘ 10-44 % pour tâches de soulèvement — De looze et al., 2016
↘ 57 % pour les postures maintenues — Koopman et al., 2019

Quels bénéfices ?

Consensus

Masse?
Abdoli & Stevenson 2006



Conception / raideur?
Frost et al., 2019

Tâche / Posture?
Koopman et al., 2019

Pas de consensus

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

Terrain
Dewi et Komatsuzaki, 2018

Tâches < 2h00 !

Consensus

Reduction of internal compressives force
Abdoli et al., 2006 - Graham et al., 2009 - Urley et Fattallah, 2013

→ - trunk rotation & lateral flexion
Graham et al., 2011 – Abdoli & Stevenson 2018

Consensus

Passive
Active

Stat.
Dynam.

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

Tendinopathies de l'épaule

Facteurs de risque

Efforts musculaires

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

Efforts ressentis

Coordination et Cinématique

CSA ?

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

Lombalgies

Facteurs de risque

Effort des muscles du dos

Burock et Sorock, 1997
Dreistatdt et al., 2016

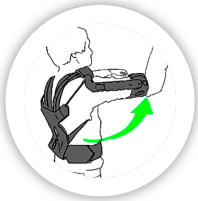
Exosquelettes (Mb Sup)

Bénéfices et limites

Consensus

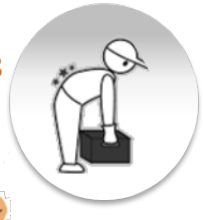
↘ Activité du muscle Deltoide anterieur

↘ Perception de l'effort local



OHW

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



Soulèvement

Theurel et al., 2018

Masse?

Rasheidi et al, 2014

Conception?

Alabadulkarim et Nussbaum, 2019

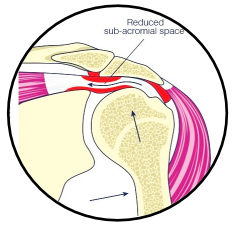
Questions?

↗ activité des muscles antagonistes

Theurel et al., 2018

≠ contribution des fléchisseurs de l'épaule

Rasheidi et al., 2014



Activité des muscles de la coiffe? – Cinématique articulaire?

Pas de consensus

↗ Muscles posturaux

Weston et al., 2018
Rasheidi et al., 2014
Theurel et al., 2018

Θ Pas d'effet

Hyusamen et al., 2018

↘ Contraintes vertébrales

Kim et al., 2018

Dynamic vs. Stat.?

Bouisset et al., 2000

Conception?
Masse et équilibre

Alabadulkarim et Nussbaum, 2019

Exosquelette “dos”

Réductions efforts des muscles du dos

Adéquation entre les **demandes de la tâche** (posture et charge) et la **conception de l’exo**

Stratégie et contrôle postural?

Exosquelette “MS”

Rééducation de l’activité des **muscles fléchisseurs** de l’épaule

CSA?

Impact sur la posture et conséquences pour les lombalgies?

Perspectives

Conséquences posturales?
Contrôle du mvt?

Cinématique articulaire?

Adaptations chroniques?

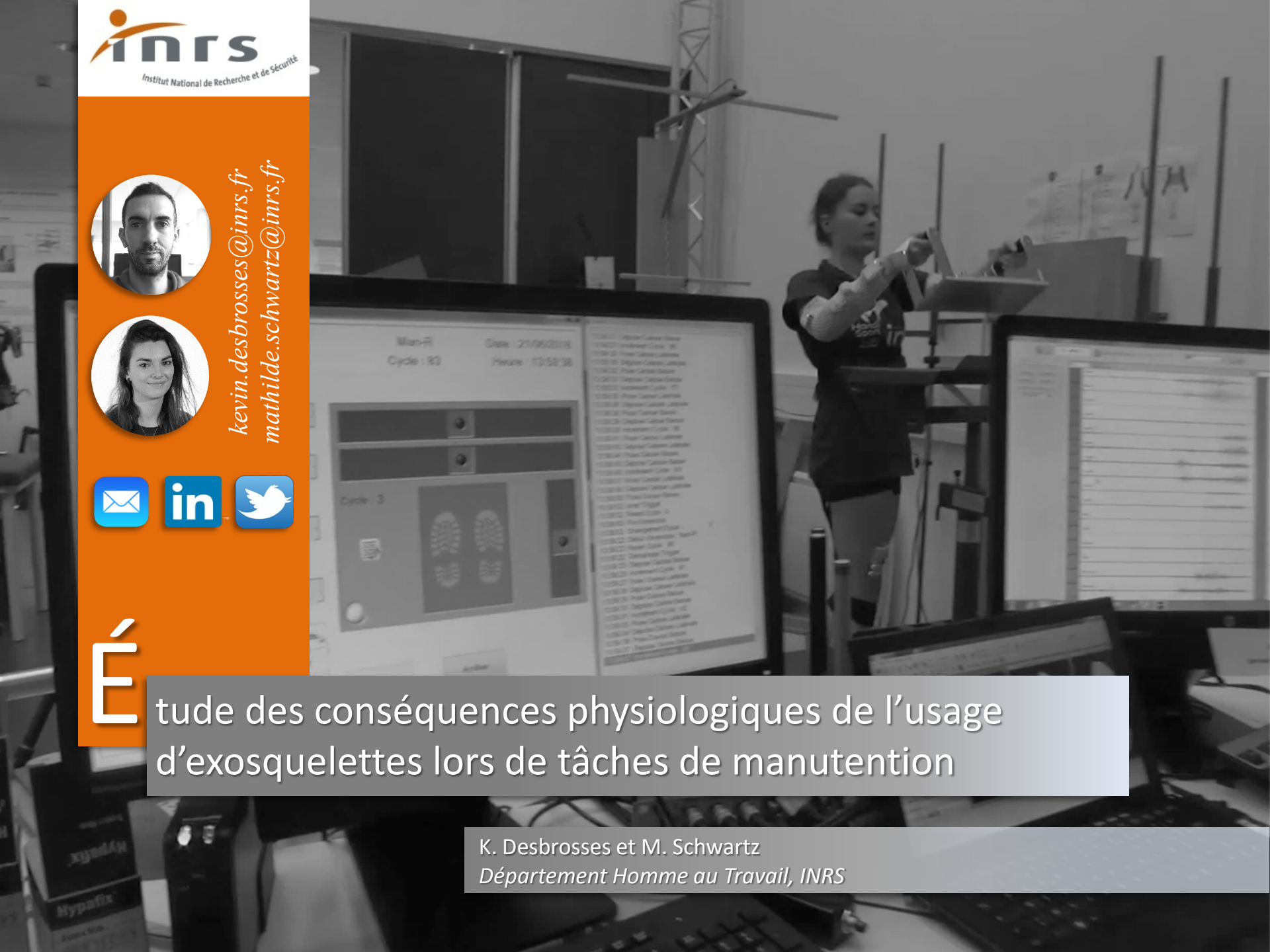
BILAN DES CONNAISSANCES

Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks , J.Theurel et al.,, Applied Ergonomics, 2018

Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs - *Etat des connaissances,* J.Theurel & L.Claudon, ED6311, INRS, 2018

Overview of their Benefits and Limits for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders, J.Theurel & K.Desbrosses, IISE Transaction on Ergonomics and Human Factors, 2019

EXPÉRIMENTATIONS (INRS 2018-2019)

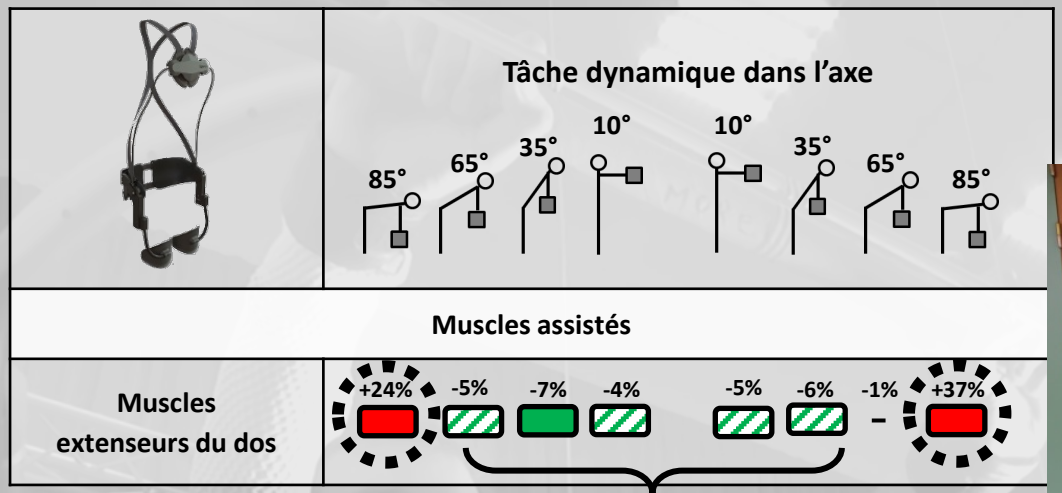


Étude des conséquences physiologiques de l'usage d'exosquelettes lors de tâches de manutention

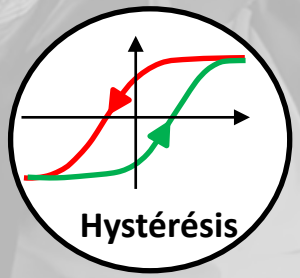
kevin.desbrosses@inrs.fr
mathilde.schwartz@inrs.fr

K. Desbrosses et M. Schwartz
Département Homme au Travail, INRS

Résultats

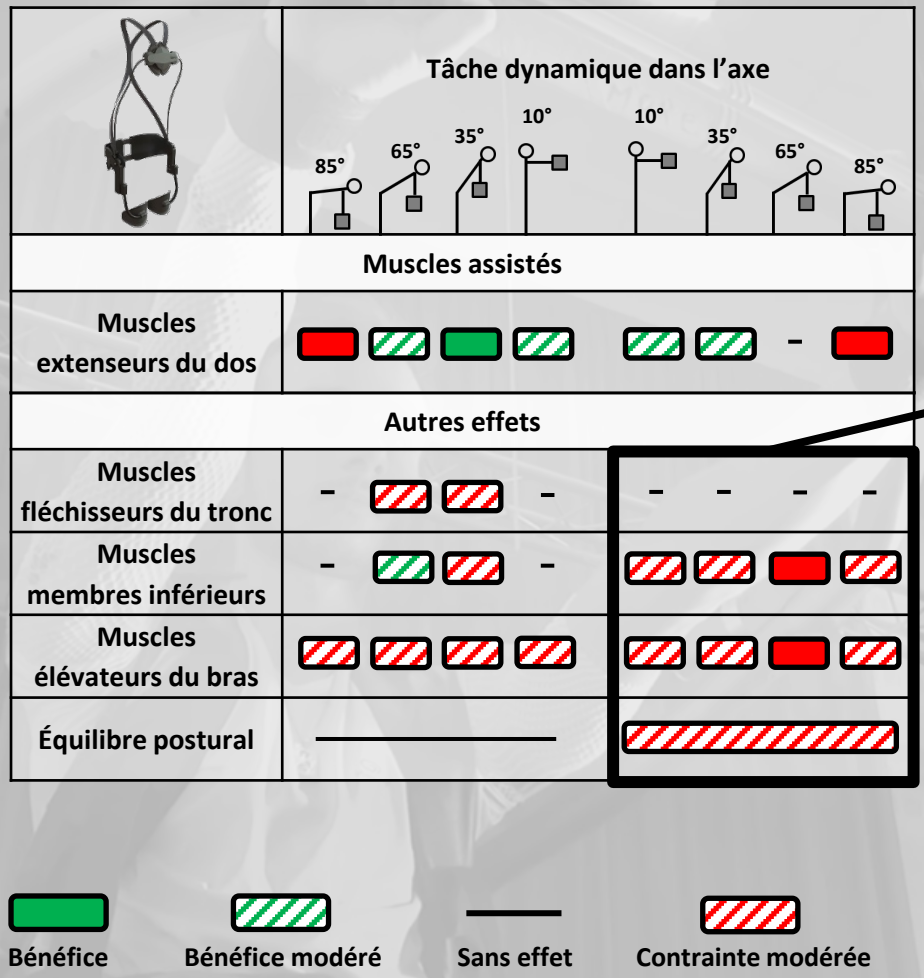


Autres inclinaisons
=
- de sollicitations des lombaires

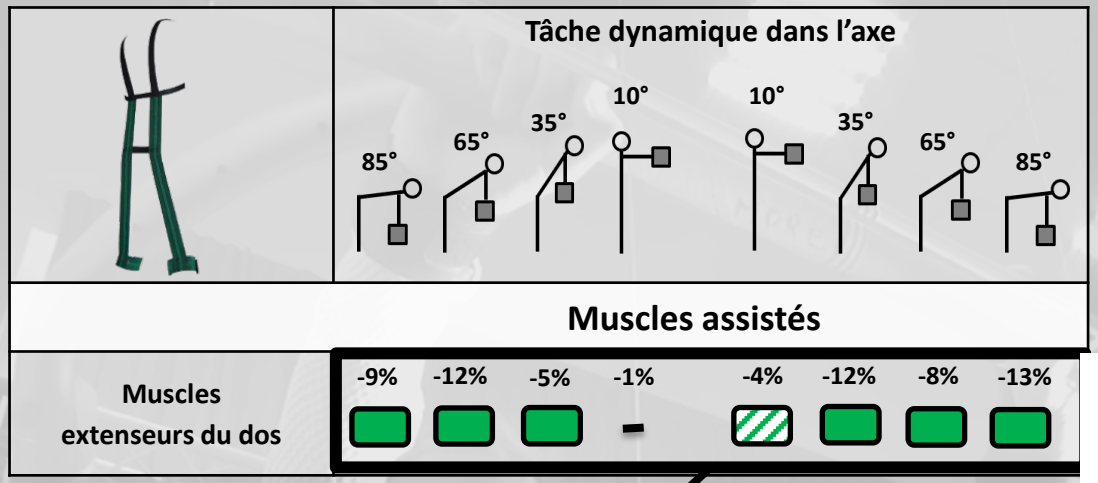


Bénéfice | Bénéfice modéré | Sans effet | Contrainte modérée | Contrainte

Résultats


Tâche dynamique dans l'axe
85°
65°
35°
10°
10°
35°
65°
85°
Muscles assistés
Muscles extenseurs du dos
Autres effets
Muscles fléchisseurs du tronc
Muscles membres inférieurs
Muscles élévateurs du bras
Équilibre postural
Mise en tension du système
Modifications posturales
Bénéfice
Bénéfice modéré
Sans effet
Contrainte modérée
Contrainte

Résultats

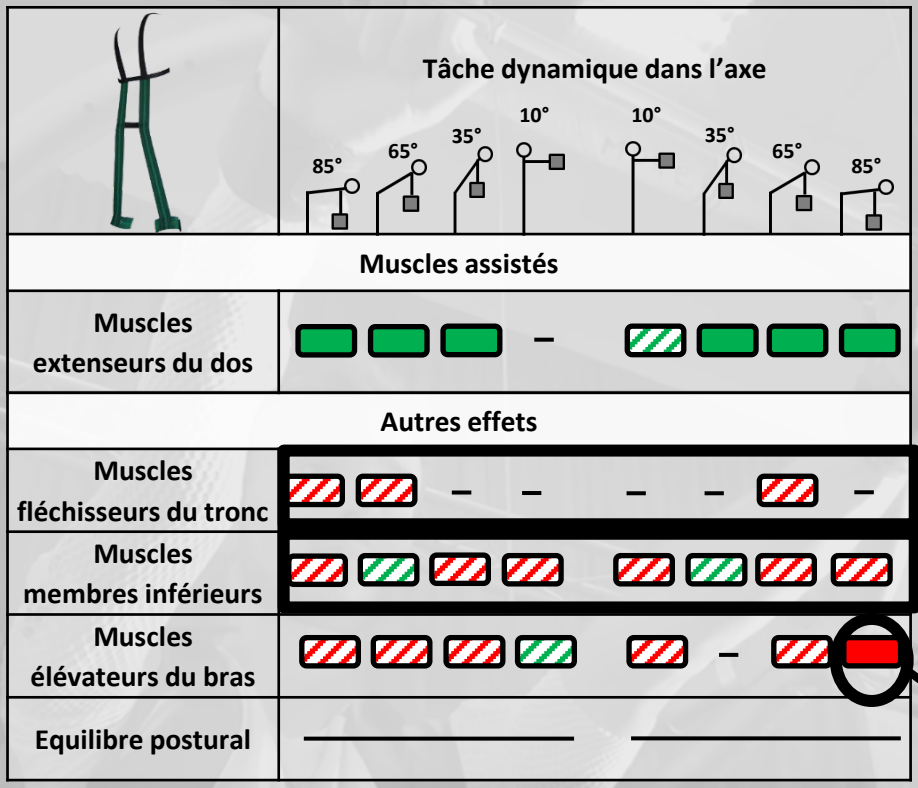


Effets bénéfiques sur une large plage angulaire

(© Deledda)

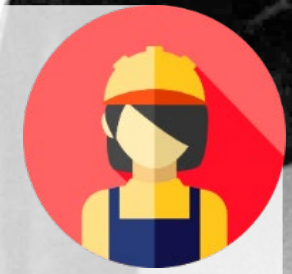
Bénéfice | Bénéfice modéré | Sans effet | Contrainte modérée | Contrainte

Résultats



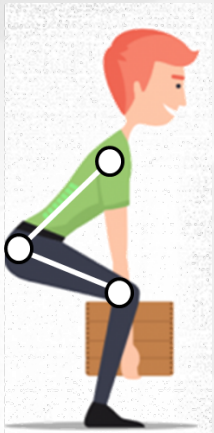
(© Deledda)

En termes pratiques



Assistance très spécifique! ⇨ Évaluation de l'interaction :

"exosquelette – humain – tâche"



Cinématique

Dans l'environnement de travail

Évaluation du besoin d'assistance physique **(Entreprises)**

Évaluation des effets de l'exosquelette **(Concepteurs et vendeurs)**

Situation de travail dans laquelle le besoin d'un exosquelette est identifié

Performances des exosquelettes

CONCLUSION

3.2

VU DU TERRAIN

TF 264

Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire

AUTEURS :
L. Wioland, L. Debay, JJ. Atain-Kouadio, département Homme au travail, INRS

EN RÉSUMÉ

L'introduction des exosquelettes, comme toute nouvelle technologie, constitue un changement au niveau de l'organisation et de l'activité des opérateurs. C'est dans ce cadre qu'est abordée la question spécifique de l'acceptabilité et de l'acceptation de ces dispositifs par les opérateurs. Pour cela, un questionnaire a été élaboré et administré à des utilisateurs, anciens utilisateurs et non-utilisateurs d'exosquelettes. En termes de santé et sécurité, les résultats préliminaires présentés permettent de recueillir des informations sur la qualité de l'interaction opérateur-exosquelette, d'identifier des points bloquants et/ou facilitateurs de l'usage de ces dispositifs et d'envisager certains facteurs de risques psychosociaux, physiques et accidentels chez les utilisateurs.

MOTS CLÉS
Exosquelette / Technologie avancée / Trouble musculo-squelettique / TMS / Pathologie articulaire

Figure 1. Exosquelette actif

CONTEXTE ET OBJECTIF

Les exosquelettes et autres dispositifs d'assistance physique, développés d'abord pour le secteur médical, émergent de plus en plus au sein des entreprises. Ils sont présentés comme des systèmes permettant de soulager les efforts et d'assister l'opérateur. Les exosquelettes sont définis comme des « structures externes, revêtues par l'opérateur, conçues pour apporter une assistance physique dans la réalisation d'une tâche », ils peuvent être énergisés (exosquelettes actifs) (figure 1) ou non énergisés (exosquelettes passifs) (figure 2) [1, 2]. Certains parlent de dispositif permettant d'améliorer les performances physiques [3]. Du point de vue de la prévention des risques professionnels, il est attendu que ces systèmes compensent les efforts des opérateurs et ainsi limitent l'apparition de troubles musculosquelettiques (TMS), lesquels représentent depuis plus de 20 ans, la première cause de

Figure 2. Exosquelette passif

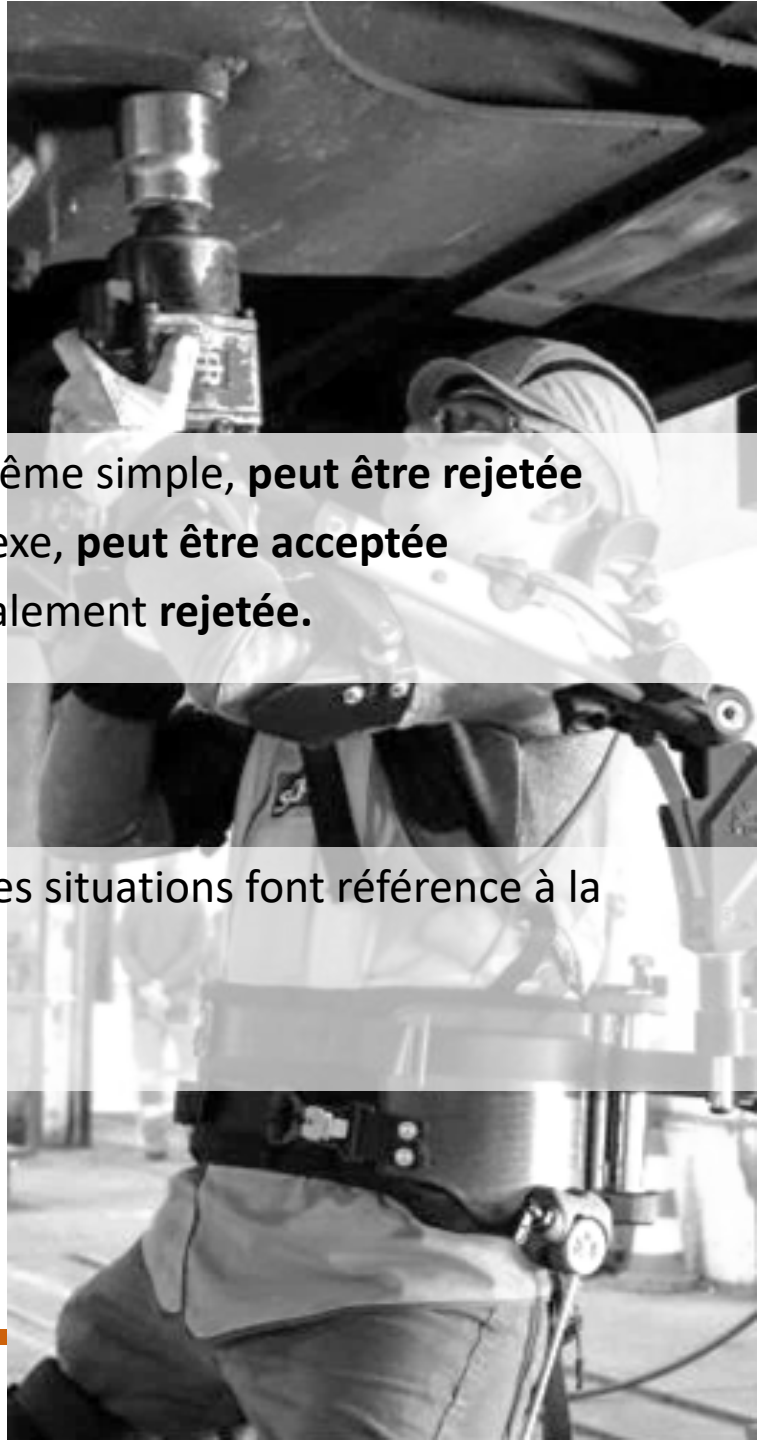
L Wioland
Psycho-ergonome

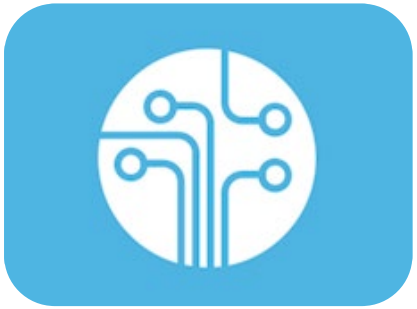
JJ Atain Kouadio
Expert d'assistance

L'ACCEPTATION

l'Acceptabilité

De quoi parlons-nous?

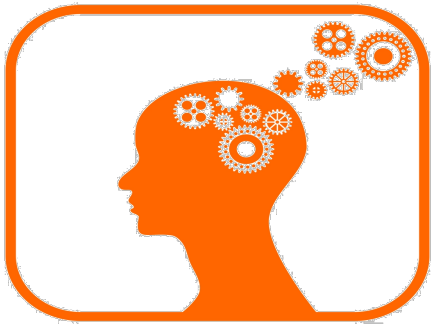




Une nouvelle technologie, même simple, **peut être rejetée**

… Alors qu'une autre, complexe, **peut être acceptée**

… au "début"… pour être finalement **rejetée.**



Les raisons sous-jacentes à ces situations font référence à la question **"d'acceptabilité".**

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

VU DU TERRAIN

TF 000

Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire

AUTEURS :
L. Wioland, L. Debay, JJ. Atain-Kouadio, département Homme au travail, INRS

EN RÉSUMÉ

L'introduction des exosquelettes, comme toute nouvelle technologie, constitue toujours un changement au niveau de l'organisation et de l'activité des opérateurs. C'est dans ce cadre qu'est abordée la question spécifique de l'acceptabilité et de l'acceptation de ces dispositifs par les opérateurs. Pour cela, un questionnaire a été spécifiquement élaboré et administré à des utilisateurs, anciens utilisateurs et non-utilisateurs d'exosquelettes. En termes de santé et sécurité, les résultats préliminaires présentés permettent de recueillir des informations sur la qualité de l'interaction opérateur-exosquelette, d'identifier des points bloquants et/ou facilitateurs de l'usage de ces dispositifs et d'envisager certains facteurs de risques psycho-sociaux, physiques et accidentels chez les utilisateurs.

MOT CLÉS
Xxxxx

Crédit photo

Figure 1. Exosquelette actif

CONTEXTE ET OBJECTIF

Les exosquelettes et autres dispositifs d'assistance physique, développés d'abord pour le secteur médical, émergent de plus en plus au sein des entreprises. Ils sont présentés comme des systèmes permettant de soulager les efforts et d'assister l'opérateur. Les exosquelettes sont définis comme des « structures externes, revêtues par l'opérateur, conçues pour apporter une assistance physique dans la réalisation d'une tâche », ils peuvent être énergisés (exosquelettes actifs) (figure 1) ou non énergisés (exosquelettes passifs) (figure 2) [1, 2]. Certains parlent de dispositif permettant d'améliorer les performances physiques [3]. Du point de vue de la prévention des risques professionnels, il est attendu que ces systèmes compensent les efforts des opérateurs et ainsi limitent l'apparition de troubles musculosquelettiques (TMS). Ces troubles représentent depuis plus de 20 ans, la première cause de

Crédit photo

Figure 2. Exosquelette passif

Références en Santé au Travail, n°157, mars 2019

6 dimensions évaluées

Conditions facilitantes (7 questions)	Déploiement en entreprise, information, formation et soutien des collègues et des encadrants
Facilité d'utilisation (9 questions)	Mise en place de l'exosquelette, rapidité d'apprentissage et utilisation de l'exosquelette (facilité de mouvement, de déplacement, sensation d'empêchement, contrôle des gestes)
Attentes de performance (9 questions)	En termes de production (vitesse, efficacité, productivité, qualité) et de sécurité et santé (efforts physiques, fatigue, conditions de travail, gênes et douleurs et concentration)
Influence sociale (4 questions)	Avis des collègues et de l'encadrement
Professionnelle et identitaire (8 questions)	Place de l'exosquelette, sens du travail, compétences et valorisation du métier
Affects (7 questions)	Agréabilité de travailler avec l'exosquelette, aimer travailler avec, anxiété, confiance et isolement

Point facilitateur si impact positif
Point bloquant si impact négatif

http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20264

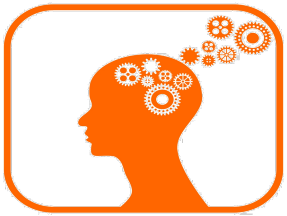
L'acceptabilité

en théorie !

Conditions facilitantes

Facilité d'utilisation

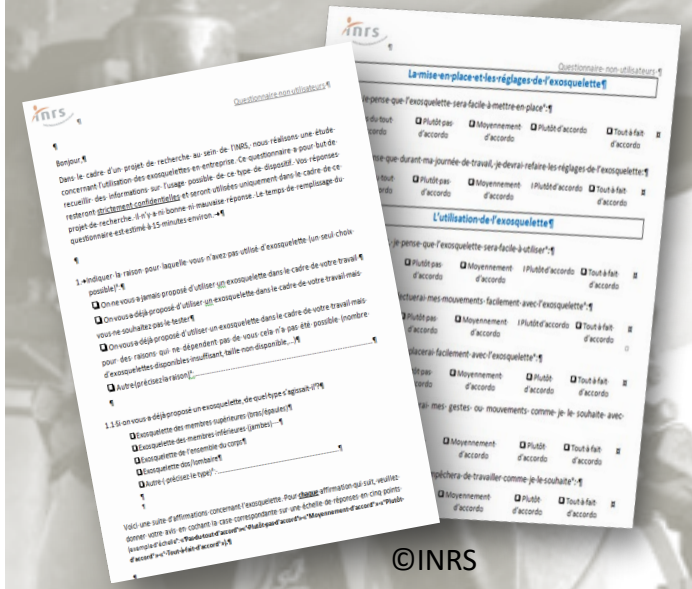
Affects



Performance

Question de l'identité professionnelle

Influence sociale

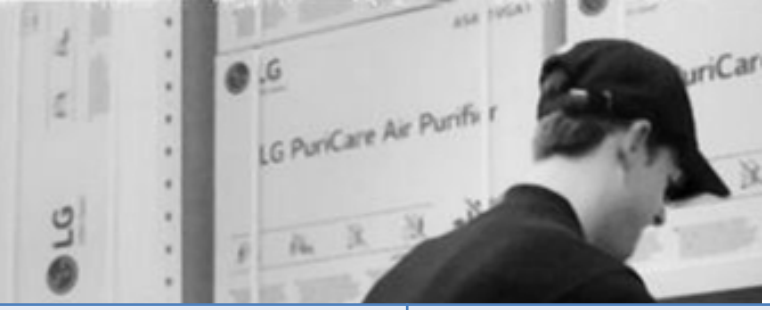


©INRS

45 questions (15 min)

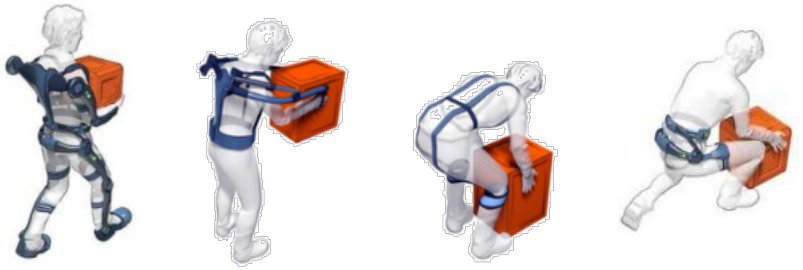
L'acceptabilité

à l'étude !



Non-Users			Users		Ex-Users
94			88		
62	11	21	44	39	4

Différents exosquelettes

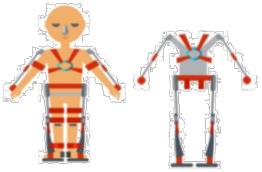


Différents secteurs

Non-Users

« Intention d'usage ou non »

Users Ex-Users

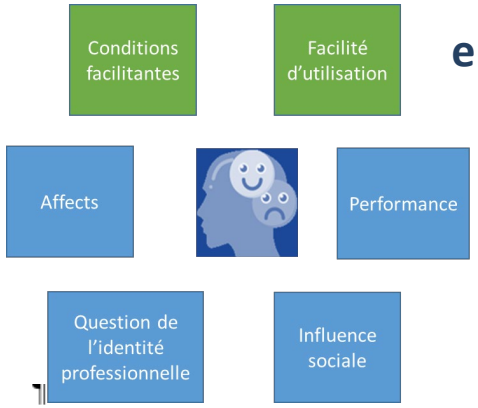


Évaluation de l'exosquelette

Points bloquants et facilitateurs

L'acceptabilité

en pratique !



Actions de prévention et de corrections sur :

- Organisation
- Intégration
- Concepteurs

¤	Items¤	Non·utilisateurs¤		Utilisateurs·ex·utilisateurs¤	
		Favorables¤	Défavorables¤	Favorables¤	Défavorables¤
●→ Tendance·majoritairement·positive·(sont·d'accord)¤					
●→ Tendance·majoritairement·négative·(ne·sont·pas·d'accord)¤					
●→ Tendance·majoritairement·mitigée¤					
Conditions·facilitantes¤	Informations·avant·déploiement¤	¤	¤	¤	¤
	Information·nécessaires¤	¤	¤	¤	¤
	Formation¤	¤	¤	¤	¤
	Procédure¤	¤	¤	¤	¤
	Suivi¤	¤	¤	¤	¤
	Référent¤	¤	¤	¤	¤
	Soutien·des·collègues¤	¤	¤	¤	¤
Facilité·d'utilisation¶ (mise·en·place)¤	Mise·en·place·de·l'exosquelette¤	¤	¤	¤	¤
	Rapidité·d'apprentissage¤	¤	¤	¤	¤
	Pas·de·concentration·supplémentaire¤	¤	¤	¤	¤

3.3

LE DÉPLOIEMENT

A. Ferry
Psychologue

JJ Atain Kouadio
Expert d'assistance

L'introduction de nouveaux dispositifs conduit **l'individu et le collectif à « reconfigurer le travail ».**

Bobillier-Chaumon et Dubois (2009)

Master
PSYCHOLOGIE SOCIALE, du TRAVAIL et des ORGANISATIONS
Parcours Accompagnement professionnel, prévention et gestion des risques

Université de Lorraine
(site de Nancy)

Année 2018/2019

Apports et limites de l'exopush sur l'opérateur équipé et sur son collectif au sein de différentes équipes d'enrobé

Anaïs Ferry

M. Jean-Jacques ATAIN-KOUADIO (Tuteur professionnel, Expert d'assistance à l'INRS)

M. Jérôme DINET (Tuteur universitaire, Enseignant-chercheur à l'université de Lorraine)

M. Benjamin PATY (Psychologue référent, Responsable de laboratoire EPAP département HT à l'INRS)

Mme Valérie SAINT-DIZIER (Relecteur, Enseignant-chercheur à l'université de Lorraine)

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Modifications dans le travail, pour **l'utilisateur,** mais aussi pour **ses coéquipiers**.

Réajustement des **stratégies de travail**.

LE COLLECTIF ET LES USAGES?

Méthodologie

de l'intervention

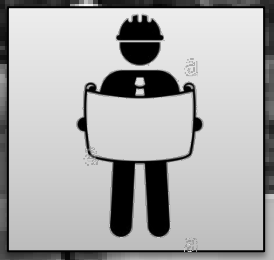
OBSERVATION	• 10 visites de chantier dont 7 filmées • caméra, micro-cravate
CADIOFRÉQUENCE MÉTRIE	• cardiofréquencemètre
ENTRETIENS INDIVIDUELS	• dictaphone
ENTRETIEN COLLECTIF	• caméras, micros • vidéoprojecteur

Résultats

Stratégie de travail

L'utilisation de l'exosquelette conduit les membres de l'équipe et leur hiérarchie à réajuster leurs stratégies de travail

Type de chantier



Rôle du chef de chantier

Mise à dispo
Autonomie

Accompagnement
Nouveaux usages

JJ Atain Kouadio
Expert d'assistance

L Kerangueven
Expert d'assistance

E Turpin Legendre
Physiologiste

L'INTÉGRATION?

Intégration

Une méthode en trois phases

Phase 1

Aide à la décision

Choix d'un exosquelette potentiellement adapté

Phase 2

Évaluation de l'interaction Homme-Exosquelette

Intégration d'un exosquelette effectivement adapté

Phase 3

Retour d'expérience

Effets à court, moyen et long terme

Phase 1

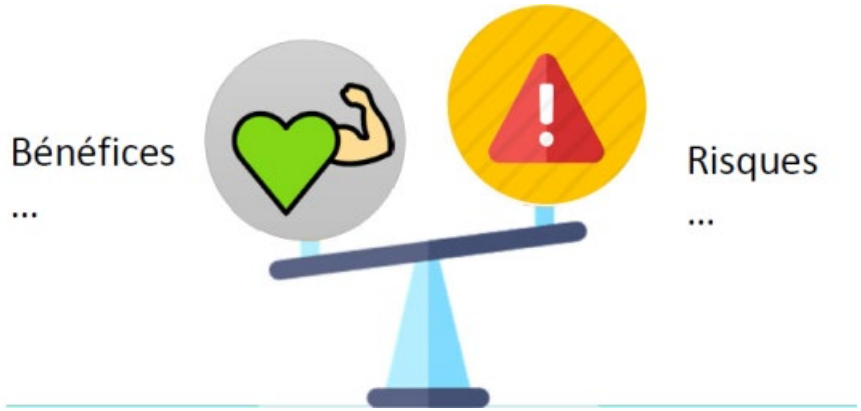
Aide à la décision

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Caractérisation du besoin d'assistance?

Analyse de l'activité

- Spécificités de la tâche de travail?
- Quels risques potentiels?

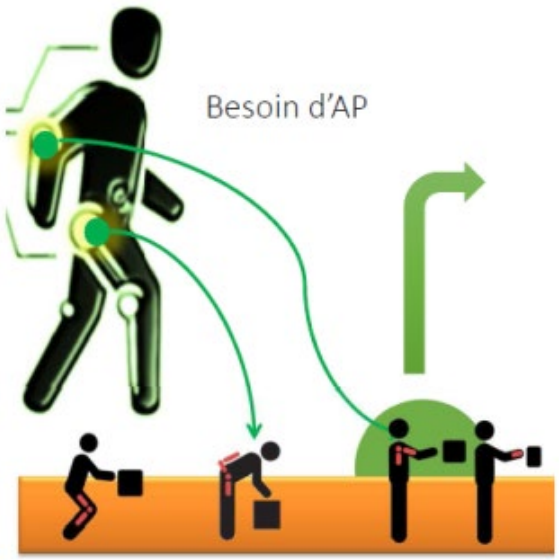


Impliquer l'utilisateur final !

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Caractérisation des fonctions de l'exosquelette?

Intégrer des critères objectifs dans le cahier des charges



- Apports et limites de la solution Exo
- Zones corporelles nécessitant une assistance
- Fonctions d'assistance souhaitées
- Conditions de réalisation de la tâche
- Besoins de réglages spécifiques

Modèle d'exosquelette

Phase 2

Évaluation de l'interaction homme/exosquelette

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Proposition de critères d'évaluation

- **L'appropriation** : fluidité du mouvement, durée de réalisation de la tâche, acceptation sociale…
- **L'utilité** : tenue du temps de cycle, respect de la qualité de l'opération, durée d'assistance active pendant la tâche…
- **L'utilisabilité** : facile à mettre en œuvre (mise en place, retrait, réglages), à utiliser, gènes…
- **L'impact** : effets sur l'opérateur, effets sur le collectif de travail, intégration à l'environnement…
- **La sécurité** : évaluation des risques pour l'opérateur, les collègues et l'environnement

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Prendre en compte les nouveaux risques?

Intégrer un exosquelette, c'est aussi introduire de nouveaux risques

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Familiarisation et apprentissage(s)

- Découverte progressive de l'exosquelette
- Nouveaux repères (fluidité des mouvements, réglages, ressentis…)
- Identification des moments où les phases d'assistance physique sont actives

- Apprentissage (Exo – tâche – environnement)
- Reconfiguration de la situation de travail
- Décision d'intégration définitive (ou non) de l'exosquelette

Phase 3

Retour d'expérience

Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention

Évaluation à court, moyen et long terme?

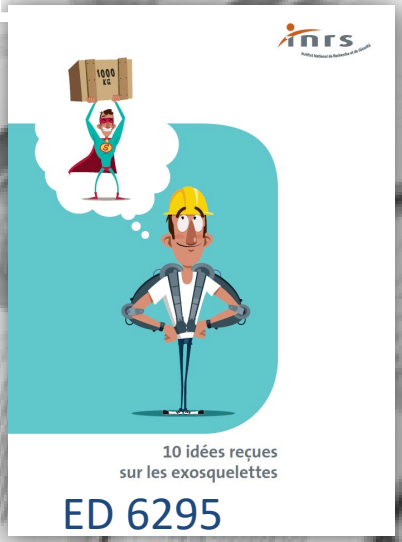
Remettre en question les apports du système

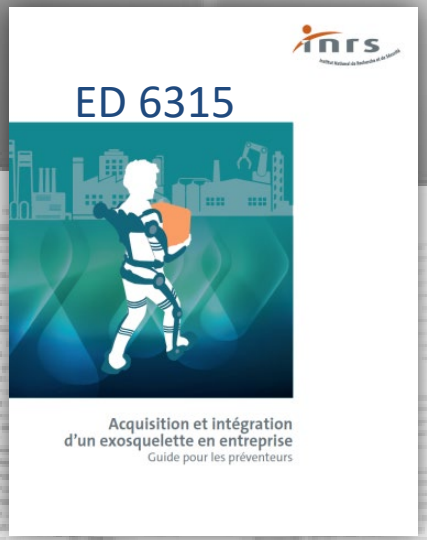
L'évaluation doit interroger différentes dimensions liées :

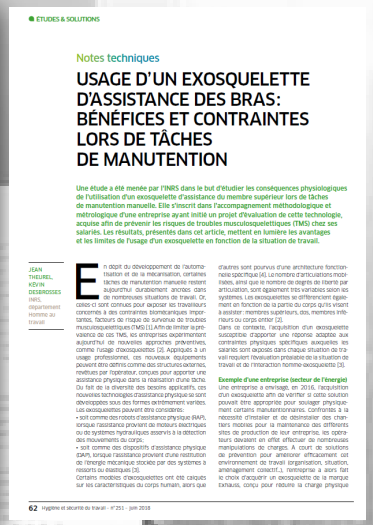
- aux opérateurs (santé, plaintes, satisfaction…)
- à la structure (AT, absentéisme, turn-over, …)
- à l'activité (changements techniques, humains et organisationnels…)

Intégration d'un exosquelette effectivement adapté

Suivi et retours d'expériences

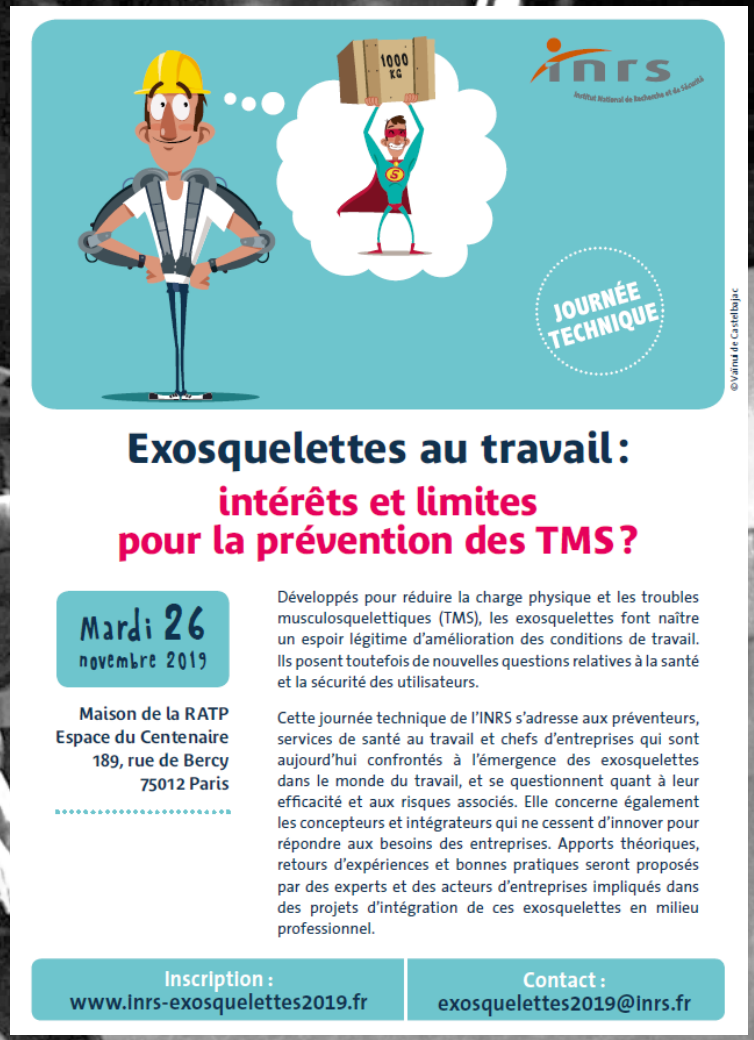






SE DOCUMENTER WWW.INRS.FR

Les Rendez-vous
travail & sécurité
19
Le XX novembre 2019
LES EXOSQUELETTES
Quels sont les intérêts et les limites des exosquelettes pour la prévention des TMS ?
Comment bien préparer leur arrivée dans l'entreprise ?
Travail & Sécurité propose une nouvelle table ronde en ligne.
Des experts en prévention et des entreprises répondront à vos questions sur cette problématique.
POSEZ VOS QUESTIONS DÈS À PRÉSENT
SUIVEZ L'ÉMISSION EN DIRECT OU EN REPLAY
Inscription sur : inrs-rendezvous-ts.fr


1000 KG
JOURNÉE TECHNIQUE
Exosquelettes au travail :
intérêts et limites pour la prévention des TMS ?
Mardi 26 novembre 2019
Maison de la RATP
Espace du Centenaire
189, rue de Bercy
75012 Paris
Développés pour réduire la charge physique et les troubles musculosquelettiques (TMS), les exosquelettes font naître un espoir légitime d'amélioration des conditions de travail. Ils posent toutefois de nouvelles questions relatives à la santé et la sécurité des utilisateurs.
Cette journée technique de l'INRS s'adresse aux préventeurs, services de santé au travail et chefs d'entreprises qui sont aujourd'hui confrontés à l'émergence des exosquelettes dans le monde du travail, et se questionnent quant à leur efficacité et aux risques associés. Elle concerne également les concepteurs et intégrateurs qui ne cessent d'innover pour répondre aux besoins des entreprises. Apports théoriques, retours d'expériences et bonnes pratiques seront proposés par des experts et des acteurs d'entreprises impliqués dans des projets d'intégration de ces exosquelettes en milieu professionnel.
Inscription : www.inrs-exosquelettes2019.fr
Contact : exosquelettes2019@inrs.fr

À SUIVRE …

jean.theurel@inrs.fr

jj.atain-kouadio@inrs.fr

Merci pour votre attention