

## SOFHYT – Place de l'ergonomie dans l'hygiène du travail



**Laurent  
KERANGUEVEN**

Département ECT

Pôle AGST



## Exosquelettes : intérêts et limites pour la prévention des TMS

1

Hardiman, 1968



**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

Un exosquelette, qu'est ce que c'est ?



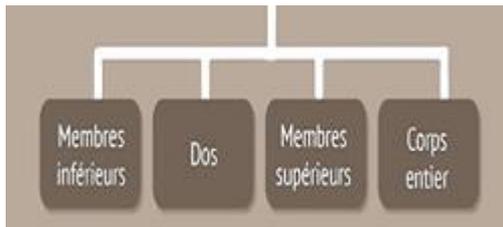
Ils sont portés par l'utilisateur  
(à contention / « wearable »)



Ils offrent une aide au mouvement  
« Assistance Physique »



DAP: Dispositif d'Assistance Physique  
RAP : Robot d'Assistance Physique



**IDÉE REÇUE N°1**

« LES EXOSQUELETES SONT  
TOUS DES ROBOTS. »

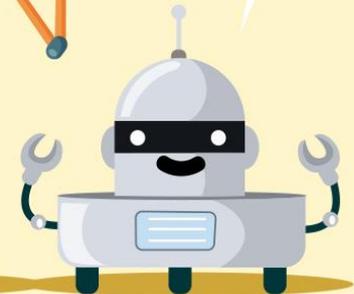
VRAI

FAUX

Et inversement, tous les robots  
ne sont pas des exosquelettes.



Absolument.



2



# APPLICATIONS PROFESSIONNELLES

Qui ?



Entreprises de toutes taille, tous secteurs

Pourquoi ?



Charge Physique  
Prévention TMS

de Looze et al., 2016



Pas d'aménagement  
Pas d'automatisation

Fox & Kotbella, 2018  
Gibbs, 2016

Pour quelles  
tâches ?



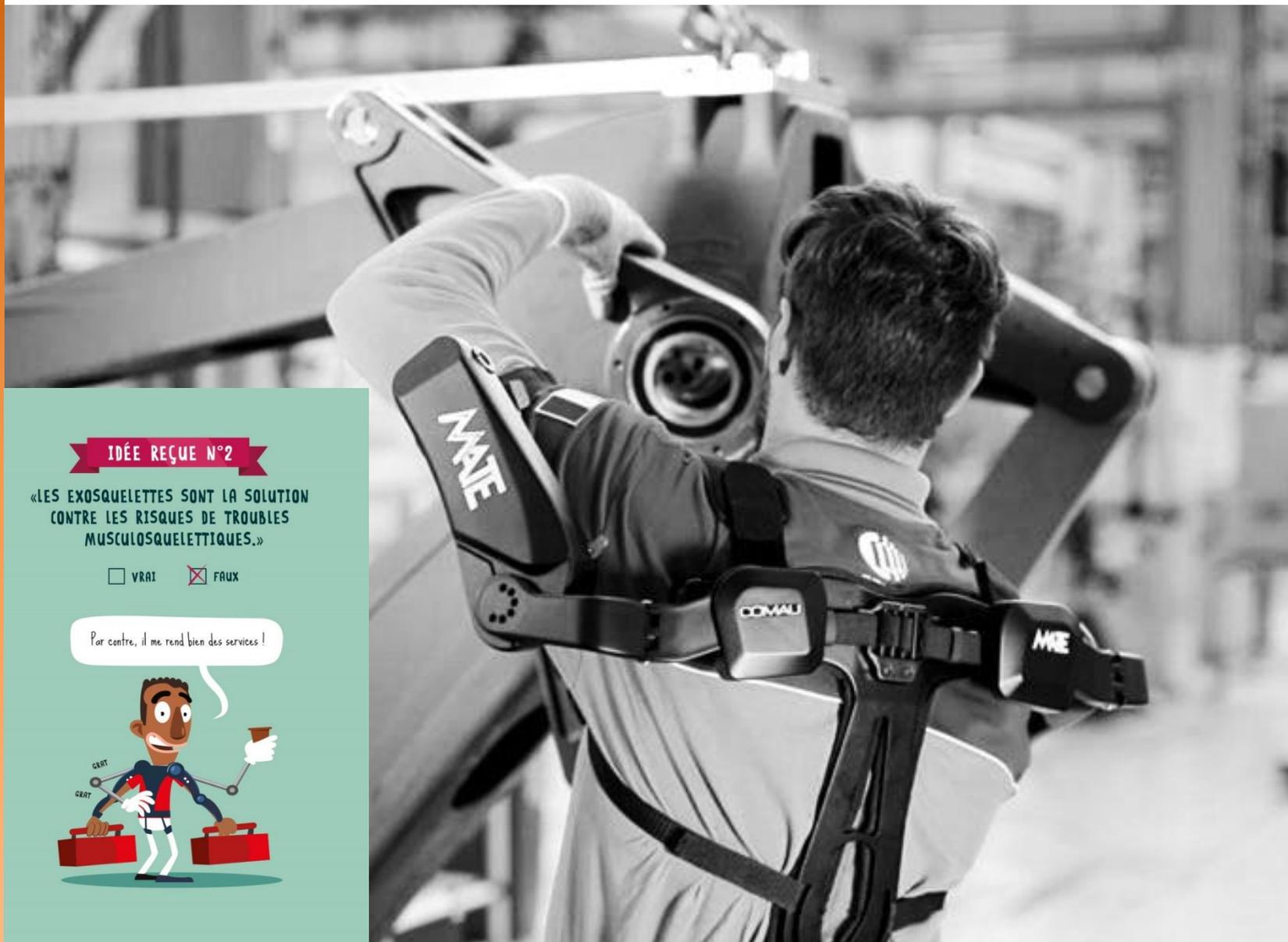
Manutention

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



Postures contraignantes

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

**IDÉE REÇUE N°2**

«LES EXOSQUELETES SONT LA SOLUTION  
CONTRE LES RISQUES DE TROUBLES  
MUSCULOSQUELETTIQUES.»

VRAI  FAUX

Par contre, il me rend bien des services !



# EXOSQUELETES ET TMS?

# TMS

## Les exosquelettes sont ils une solution ?

Theurel & Desbrosses Transaction on Ergonomics and Human Factors, 2019  
Theurel & Claudon ED6311, INRS



**FORCE**

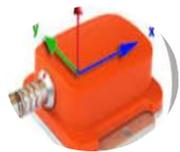
Autres facteurs :  
Répétitivité, Posture



**Autres  
Conséquences**



**Autres facteurs de  
risques de TMS**  
(RPS, Organisation...)



**Coordination motrice, activité  
musculaire, posture, équilibre, ...**

**IDÉE REÇUE N°2**

**«LES EXOSQUELETES SONT LA SOLUTION  
CONTRE LES RISQUES DE TROUBLES  
MUSCULOSQUELETTIQUES.»**

VRAI

FAUX

Par contre, il me rend bien des services !





« Occupational »  
« Work »



« Exoskeleton »  
« Assistive Devices »

# Lombalgie

## Facteurs de risque



### Effort des muscles du dos

Burock & Sorock, 1997  
Dreistatdt et al., 2016



### Fatigue musculaire

Hoogendoorn et al., 2002



### Contraintes vertébrales

Burock & Sorock, 1997  
Cholewicki & Mc Gil, 1996



### Effort perçu

Reenen et al., 2008  
Clarke & Harris, 2004

# Exosquelette "dos"

## Benefices et limites

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

### Amplitudes des bénéfiques ?

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 & Komatsuzaki, 2018*

----- Tâches < 2h00 ! -----

Consensus

Réduction des forces de compressions internes

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

rotation du tronc & flexion latérale

*Graham et al., 2011 - Abdoli & Stevenson 2018*



Consensus



DAP  
RAP



Stat.  
Dynam.

*Balstruch et al., 2018*  
*Bosh et al., 2016*  
*Hysamen et al., 2018*  
...

# Tendinopathies de l'épaule

## Facteurs de risque



### Efforts musculaires

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



### Efforts ressentis



### Coordination & Cinématique Conflit sous-acromial ?

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

# Lombalgies

## Facteurs de risque



### Effort des muscles du dos

Burock & Sorock, 1997  
Dreistadt et al., 2016

# Exosquelettes (Mb Sup)

## Bénéfices et limites

- ✔ Activité du muscle Deltoide Anterieur
- ✔ Perception de l'effort local

Consensus



### OHW

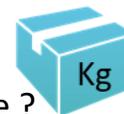
Hysusamen et al., 2018  
Rasheidi et al, 2014  
Kim et al., 2018



### Soulèvement

Theurel et al., 2018

...



Masse ?

Rasheidi et al, 2014



Conception ?

Alabadulkarim & Nussbaum, 2019

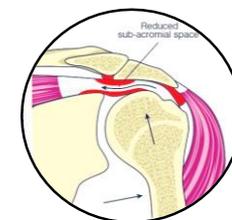
Questions ?

- ✔ 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

- Pas d'effet

Hysusamen et al., 2018

- ✔ Contraintes vertébrales

Kim et al., 2018

Dynamic vs. Stat. ?

Bouisset et al., 2000

Conception ?

Masse & équilibre

Alabadulkarim & Nussbaum, 2019



# Une assistance très spécifique et très localisée



Posture de travail  
Plage angulaire

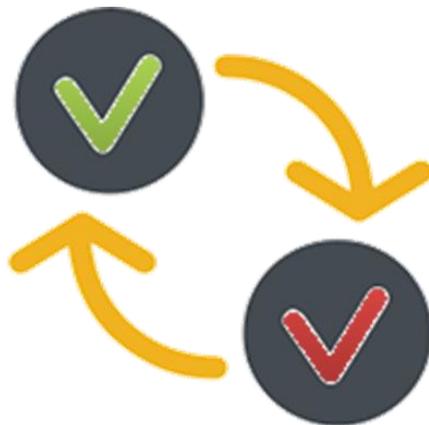


Charge manipulée



Conception de l'EXO  
Point de contact  
Masse  
Raideur  
Equilibre antéro-postérieur

## INTERETS



## LIMITES

QUELS EXOSQUELETES  
POUR QUELS BESOINS ?

### IDIÉE REÇUE N°8

«LES EXOSQUELETES SONT IMMÉDIATEMENT  
UTILISABLES EN SITUATION DE TRAVAIL.»

VRAI

FAUX

Euh... Envoyez la sécurité, Régis est resté coincé avec son exosquelette.



6



**L'INTEGRATION EN ENTREPRISE ?**

# Une approche spécifique

Proposition d'une méthodologie d'action



JJ Atain Kouadio  
Expert d'assistance



L Keranguéven  
Expert d'assistance



E Turpin-Legendre  
Physiologiste



## Triple objectifs :

- Accompagner l'entreprise dans sa prise de décision d'acquisition d'un exosquelette
- Procéder à toutes les étapes d'évaluation nécessaires à l'identification des apports et des limites que pourraient générer l'intégration d'un exosquelette
- Créer les conditions permettant l'intégration optimale de l'exosquelette dans la situation de travail et l'acceptation de la technologie par les utilisateurs

# Mise en œuvre de la méthode

Se poser collectivement les bonnes questions



- Démarche participative qui mobilise la direction et l'ensemble des acteurs concernés
- Elaboration d'un "groupe pluridisciplinaire" : direction, production, qualité, instances représentatives du personnel, service de santé au travail, préventeurs, opérateurs, etc.

# Structure de la méthode

Phase 1

Aide à la décision

*Choix d'un exosquelette potentiellement adapté*

Phase 2

Evaluation de l'interaction Homme-Exosquelette

*Intégration d'un exosquelette effectivement adapté*

Phase 3

Retour d'expérience

*Effets à court, moyen et long terme*

A  
C  
C  
E  
P  
T  
A  
T  
I  
O  
N



Phase 1  
Aide à la décision

Phase 2  
Evaluation de l'interaction Homme-Exosquelette

Phase 3  
Retour d'expérience

# Phase 1



# Aide à la décision

# Les questions préalables à se poser



Quelle est la problématique de l'entreprise ?



Peut-on éliminer les problèmes à la source ?



Dispose t-on de moyens de prévention collective ?



Les technologies d'assistance physique peuvent elles convenir comme moyen de prévention individuelle ?

# Analyse de l'activité des salariés

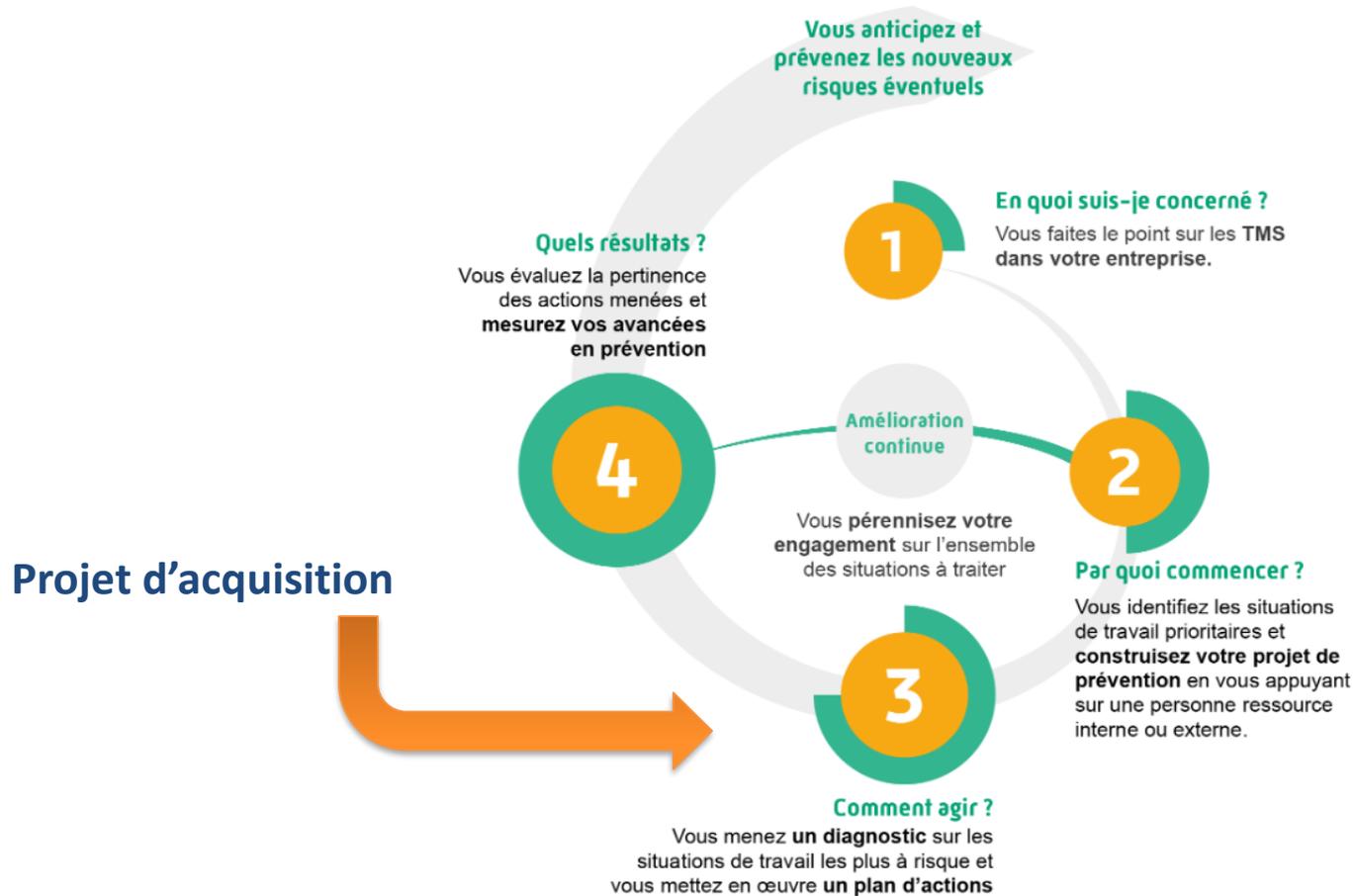


- Compréhension fine de l'activité des salariés
- Identification des facteurs de risques et des déterminants de l'activité
- Recherche de pistes de prévention



Identifier les tâches nécessitant une assistance physique spécifique

# S'inscrire dans une démarche de prévention



[www.ameli.fr/entreprise](http://www.ameli.fr/entreprise)

# Caractérisation du besoin d'assistance physique

## IDÉE REÇUE N°7

«LES EXOSQUELETTES SONT ADAPTÉS À  
TOUTES LES SITUATIONS DE TRAVAIL.»

Ah non, par exemple, pour peindre  
les détails... C'est un carnage !



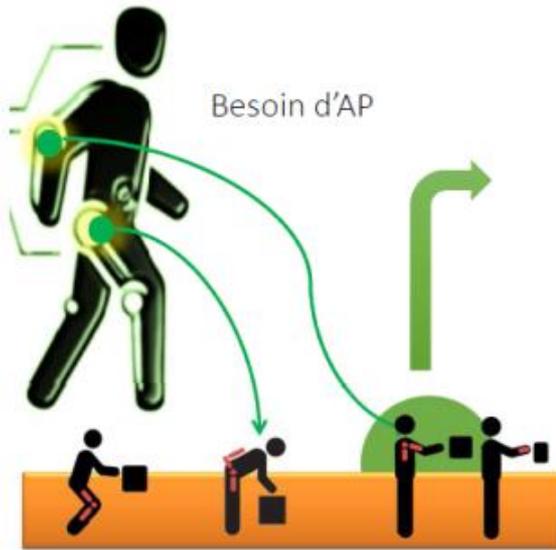
© Vainui de Castelbajac pour l'INRS

## Spécificités de la tâche de travail ?

- Identification des zones à soulager
- Description des caractéristiques physiques
- Description des caractéristiques de l'environnement
- Description de l'organisation du travail

# Caractérisation des fonctions de l'exosquelette

Intégrer des critères objectifs dans un cahier des charges



- Zones corporelles nécessitant une assistance
- Fonctions d'assistance souhaitées
- Conditions de réalisation de la tâche
- Besoins de réglages spécifiques



Modèle d'exosquelette



Impliquer l'utilisateur final !

# Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette

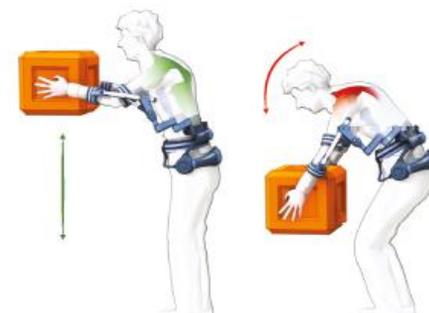
Nouveau guide téléchargeable sur [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr) (ED 6416)

- Faciliter le processus de sélection d'un exosquelette
- Orienter l'entreprise vers les principaux paramètres à prendre en compte



## 4 étapes proposées

1. Définir les caractéristiques de la tâche de travail pour préciser le besoin d'assistance physique.
2. Déterminer une catégorie d'exosquelettes adaptée au besoin d'assistance physique identifié.
3. Évaluer les bénéfices escomptés de l'exosquelette.
4. Évaluer les autres effets liés à l'usage de l'exosquelette.



# Phase 2



Evaluation de l'interaction homme/exosquelette

# Proposition de critères d'évaluation

- **L'appropriation** : l'opérateur s'approprie l'équipement dans son environnement de travail  
Fluidité du mouvement, maîtrise de l'équipement, ...
- **L'utilité** : la tâche est réalisée avec succès  
Tenue des délais, respect de la qualité de l'opération, ...
- **L'utilisabilité** : la facilité d'emploi de l'équipement  
Facilité de mise en place, de réglages, d'utilisation, ...
- **L'impact** : effets sur les stratégies opératoires de l'utilisateur, sur l'environnement et le collectif de travail  
Contraintes physiques, répartition temporelle des tâches, ...
- **La sécurité** : les risques pour la sécurité de l'opérateur, les collègues et l'environnement  
Risques de blessures, dégradation de l'exosquelette, ...

La prise en compte du **ressenti des opérateurs** est indispensable pour chacun des critères

# Prendre en compte les nouveaux risques

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

## Exosquelettes au travail : 6 points de vigilance

Les exosquelettes peuvent soulager les opérateurs mais... leur usage n'est pas sans risque.

1 Les frottements et les pressions répétés de l'exosquelette sur certaines parties du corps peuvent être à l'origine d'**INCONFORT ET/OU D'IRRITATIONS DE LA PEAU**.

2 Certaines activités réalisées à l'aide d'exosquelettes exigent une attention accrue qui peut s'accompagner d'une **AUGMENTATION DU STRESS**.

3 Les exosquelettes, de par leur encombrement et leur structure, présentent des **RISQUES DE COLLISION** avec une tierce personne ou des éléments de l'environnement.

4 Les exosquelettes sont susceptibles de modifier la perception des efforts et d'entraver les gestes, ce qui peut se traduire par un **DÉSÉQUILIBRE ET/OU DES MOUVEMENTS INCONTRÔLÉS**.

5 L'usage des exosquelettes modifie la répartition des efforts et peut ainsi contribuer à l'apparition de **NOUVELLES CONTRAINTES BIOMÉCANIQUES**, facteurs de risque de troubles musculosquelettiques (TMS).

6 Le poids des exosquelettes et la gêne associée lors de la réalisation de certains mouvements peuvent conduire à une **AUGMENTATION DES SOLlicitATIONS CARDIOVASCULAIRES**.

Pour en savoir plus : [www.inrs.fr/exosquelettes](http://www.inrs.fr/exosquelettes)

 Institut National de Recherche et de Sécurité

# Familiarisation et apprentissage(s)



- Découverte progressive de l'exosquelette
  - Nouveaux repères (fluidité des mouvements, réglages, ressenti, ...)
  - 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 1  
Aide à la décision

Phase 2  
Evaluation de l'interaction Homme-Exosquelette

Phase 3  
Retour d'expérience

# Phase 3



# Retour d'expérience

# Retour d'expérience et suivi dans le temps

Remettre en question les apports du système



L'évaluation doit interroger différentes dimensions liées :

- Aux opérateurs (santé, plaintes, satisfactions, ...)
- À la structure (AT, absentéisme, turn-over, ...)
- À l'activité (changements techniques, humains et organisationnels, ...)

maintien ? modification ? abandon ?



déploiement à d'autres situations de travail ?





L. Wioland  
Psycho-ergonome



JJ Atain Kouadio  
Expert d'assistance

7



VU DU TERRAIN

inrs 17 261

## Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire

AUTEURS :  
L. Wioland, J. Deby, 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'intervention opérateur-exosquelette, d'identifier des points bloquants et des 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 / Fatigue 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 définies 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 effets des opérateurs et ainsi limitent l'apparition de troubles musculo-squelettiques (TMS), lesquels représentent depuis plus de 20 ans, la première cause de

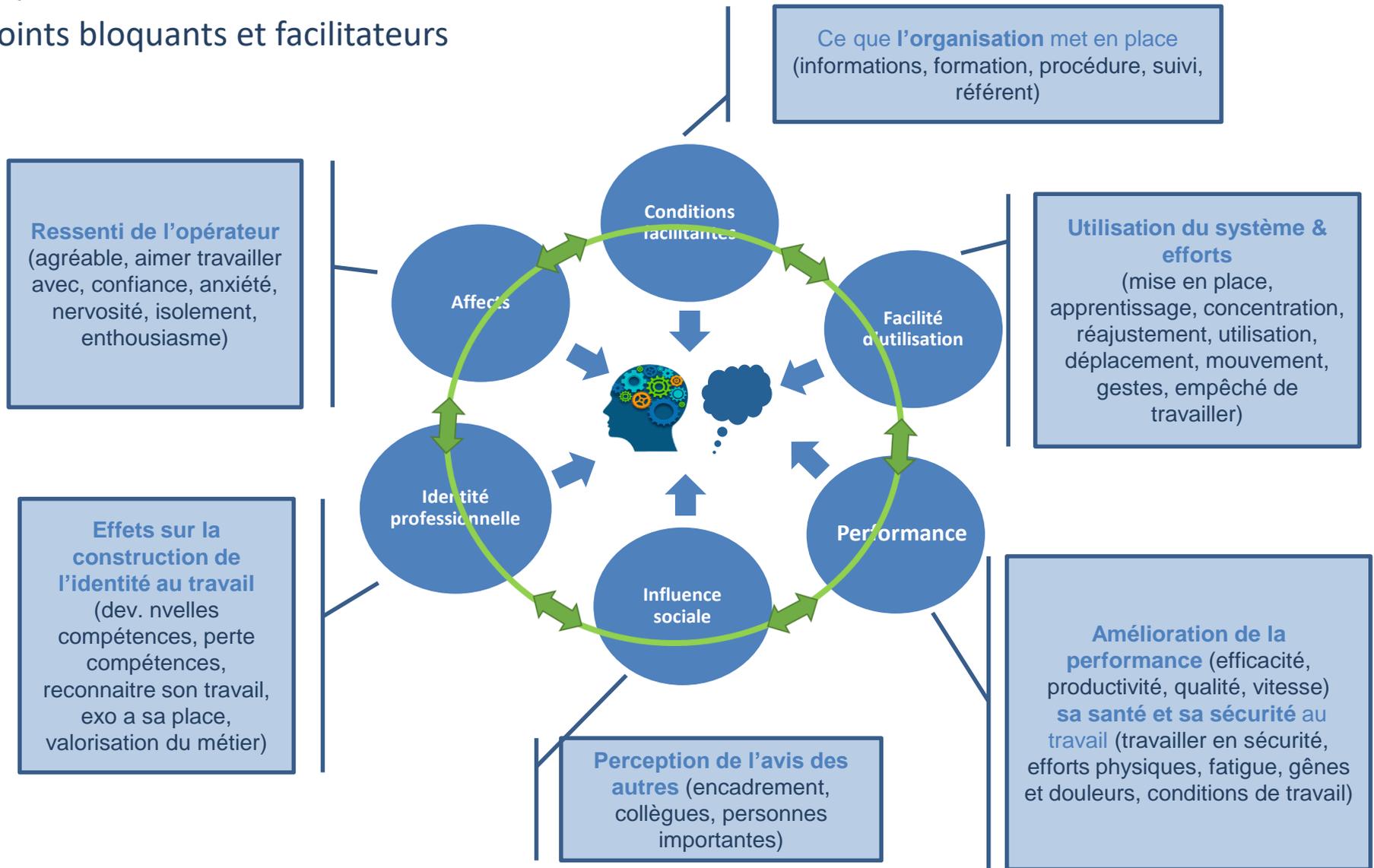


Figure 2. Exosquelette passif

# L'ACCEPTATION ?

# Questionnaire

## Points bloquants et facilitateurs







# Une offre d'information complète

## ➔ S'informer en amont

Décrypter les idées reçues

**10 idées reçues sur les exosquelettes**

ED 6295

Approfondir ses connaissances

**Exosquelettes au travail : Impact sur la santé et la sécurité des opérateurs**  
Etat des connaissances

ED 6311

Identifier les risques

**USAGE D'UN EXOSQUELETTE D'ASSISTANCE DES BRAS : BÉNÉFICES ET CONTRAINTES LORS DE TÂCHES DE MANUTENTION**

NT 62

**Exosquelettes au travail : 6 points de vigilance**  
Les exosquelettes peuvent soulager les opérateurs mais... leur usage n'est pas sans risque.

Infographie

# Une offre d'information complète

## → Agir en entreprise

Structurer sa démarche d'acquisition et d'intégration

Favoriser l'acceptation

L'essentiel à retenir avant l'acquisition d'un exosquelette



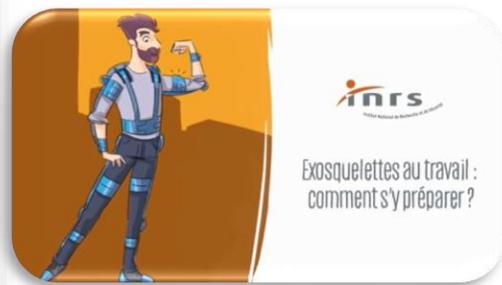
ED 6315



TF 264



TF 274



Vidéo dessinée

# Une offre d'information complète

## ➔ Bénéficiaire de retour d'expérience

Reportages en entreprise

Table ronde télévisée

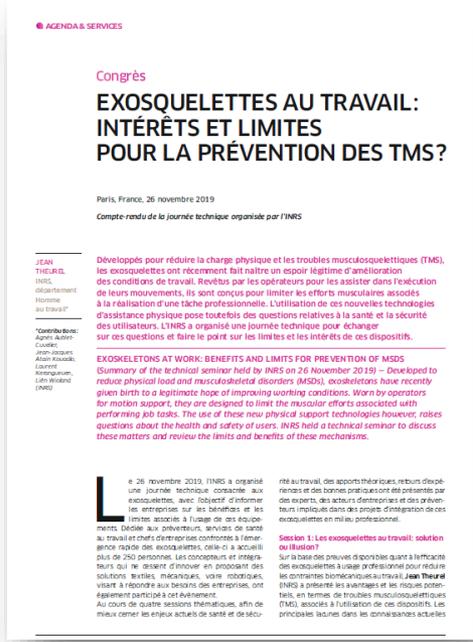
Journée technique



TS n°810, novembre 2019



Replay disponible sur Youtube



CC32

# Une offre d'information complète



Une FAQ : <https://www.inrs.fr/risques/exosquelettes/faq.html>

## 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 ?
- + 5. Existe-t-il des systèmes de location longue durée d'exosquelettes ?

## Performance

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

## Port de charges

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

## 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 à prendre en considération lors de l'utilisation d'un exosquelette ?
- + 11. Porter un exosquelette a-t-il

## Accompagnement et formation

- + 25. Comment favoriser l'acceptation ?
- + 26. Combien de temps faut-il pour
- + 27. Une formation spécifique sur elle nécessaire pour les Sauveteurs ou proposera-t-il des formations ?

## Organisation

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

## 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 l'emploi ? Y-a-t-il des contre-indications au port d'un exosquelette vis-à-vis d'une pathologie ou d'un handicap ?
- + 22. Existe-t-il des exosquelettes dédiés aux aides-soignants ? En particulier, ces dispositifs qui semblent pouvoir soulager les salariés exposés aux manutentions de charges sont-ils adaptés à la mobilisation des personnes ?
- + 23. A-t-on des retours d'expérience sur l'intégration d'exosquelette dans le secteur du BTP ?
- + 24. Du point de vue de l'hygiène alimentaire, les exosquelettes sont-ils adaptés au secteur de l'agro-alimentaire ?



M

erci pour votre attention

**EXO**  
GROUPE



[laurent.kerangueven@inrs.fr](mailto:laurent.kerangueven@inrs.fr)



01 40 44 14 08