



# E XOSQUELETES AU TRAVAIL:



Jean Jacques ATAIN KOUADIO - Laboratoire EPAP - HT, INRS / Olivier Tierno - Ingénieur Conseil- Carsat Sud-Est



# Mobilitéé



Viteckova et al., 2013

# Augmentation



# Applications militaires

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



# Assistance physique



# Applications industrielles



# Le concept

## Vers un Homme Augmenté ?



*Hardiman, 1968*  
Exosquelette à structure motorisée



Applications militaires et médicales



*Gopura et al, 2015*

Applications industrielles

Innovations Technologiques



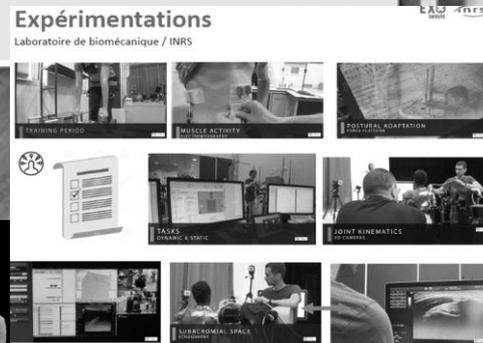
Ils offrent une aide au mouvement  
« assistance physique »



Ils sont revêtus par l'utilisateur  
« à contension »

# UNE APPROCHE MULTIDISCIPLINAIRE

## Construire connaissances et repères dans l'action



2013

2015

2016

2017

2018

2019

2022

**Etude  
Prospective**

**Etat des lieux  
(Réseau prévention)  
(AFNOR)**

**Equipe pluridisciplinaire**



**(Recherche, Veille Technologique, Normalisation, Assistance, Communication)**

**1<sup>ère</sup> Campagne d'information  
(CARSAT, Entreprises, SST)**

# Veille Technologique

Exemple de DAP dos



# Veille Technologique

Exemple de DAP membres supérieurs



# Veille Technologique

Exemple de RAP MS ou Dos ou Main



# Quel type d'assistance physique robotisée

## Risques TMS



Situation de travail

++

AUTOMATISATION

--

ROBOTISATION

Opérations MANUELLES



Robot industriel

--

BESOIN A-P RESIDUEL

++

PREVENTION



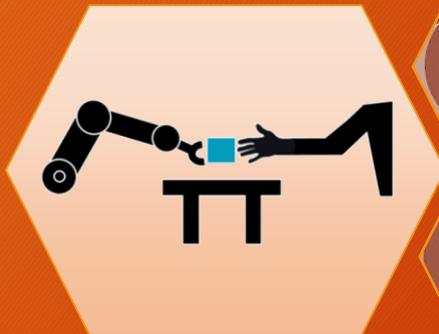
Risques Machines

Risques liés à l'interaction  
Homme Système technique

Risques AP



PREVENTION



Partage d'espace, Collaboration indirecte, directe...



RAPsc

Collaboration directe  
guidé manuellement sans contention

Besoin d'Assistance  
Niveau de mobilité



RAPac  
« Exosquelette »

Collaboration  
directe  
avec contention

--

COLLABORATION SYSTÈME-HUMAIN

++

# Le contexte



Entreprises de toutes tailles, tous secteurs



Manutention

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



Charge Physique  
Prévention TMS

de Looze et al., 2016

Pas d'aménagement  
Pas d'automatisation

Fox & Kotbella, 2018  
Gibbs, 2016

Postures contraignantes

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

# Les TMS



Contraintes biomécaniques =  
**Force, Répétitivité, Posture**



Effets non désirés des exosquelettes  
sur ces facteurs de risque



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



D'autres facteurs de risques de TMS  
(RPS, Organisation...)

## IDÉE REÇUE N°2

«LES EXOSQUELLETES SONT LA SOLUTION  
CONTRE LES RISQUES DE TROUBLES  
MUSCULOQUELETTIQUES.»

VRAI

FAUX

Par contre, il me rend bien des services !



# Lombalgie

## Facteurs de risque



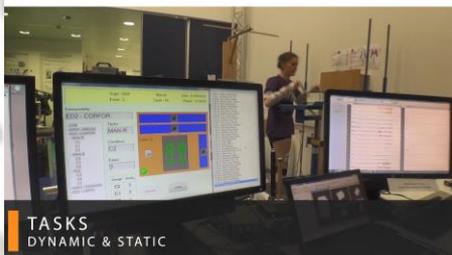
### Effort des muscles du dos

Burock & Sorock, 1997  
Dreistadt et al., 2016



### Fatigue musculaire

Hoogendoorn et al., 2002



# 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

### Amplitudes des bénéfiques ?

Consensus



Masse ?

Abdoli & Stevenson 2006



Conception / raideur?

Frost et al., 2019



Tâche / Posture ?

Koopman et al., 2019

Pas de Consensus



Laboratoire

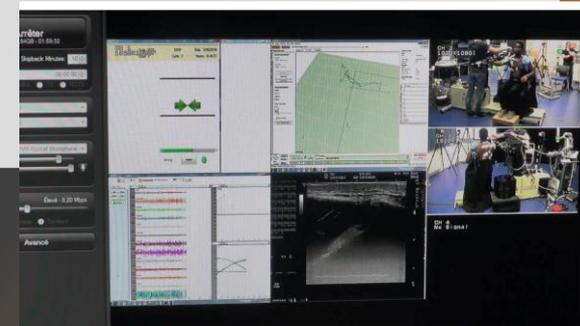
Bosch et al., 2016  
Lotz et al., 2009  
Godwin et al., 2009



Terrain

Dewi & Komatsuzaki, 2018

Tâches < 2h00 !



# 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



SUBACROMIAL SPACE  
ECHOGRAPHY

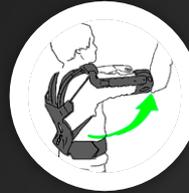
# Exosquelettes (Mb Sup)

## Bénéfices et limites

Activité du muscle Deltoidé Antérieur

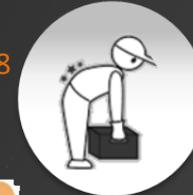
➤ Perception de l'effort local

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

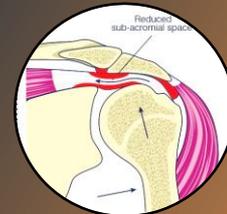
Questions ?

➤ activité des muscles antagonistes

contribution ≠ des fléchisseurs de l'épaule

Rasheidi et al., 2014

Activité des muscles de la coiffe ? – Cinématique articulaire ?





## 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"

Réduction 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 ?

# LES EXOSQUELETES APPORTENT UNE ASSISTANCE TRÈS SPÉCIFIQUE ET LOCALISÉE



Position de travail  
Plage angulaire

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

Charge manipulée

## QUELS EXOSQUELETES POUR QUELLES TÂCHES

?

### INTERETS



### LIMITES

### IDÉE 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.





# A

## APPLICATIONS

### NOS ACTIONS



# Une offre d'information complète

## → S'informer en amont

Décrypter les idées reçues

Approfondir ses connaissances

Identifier les risques

**10 idées reçues sur les exosquelettes**

ED 6295

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

ED 6311

**Notes techniques**

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

Une étude a été menée par l'INRS dans le but d'étudier les conséquences physiologiques de l'utilisation d'un exosquelette d'assistance du membre supérieur lors de tâches de manutention manuelle. Elle s'inscrit dans l'accompagnement méthodologique et méthodique d'une entreprise ayant initié un projet d'évaluation de cette technologie, afin de prévenir les risques de troubles musculo-squelettiques (TMS) chez ses salariés. Les résultats, présentés dans cet article, mettent en lumière les avantages et les limites de l'usage d'un exosquelette en fonction de la situation de travail.

**EXEMPLE D'UNE ENTREPRISE SECTEUR DE l'ÉNERGIE**

Une entreprise a envisagé, en 2013, l'acquisition d'un exosquelette afin de limiter et éviter l'éclaireur jusqu'à son arrivée pour soulever physiquement les objets de travail. Cependant, à la suite d'un diagnostic de l'impact de ce dispositif sur les salariés, il a été décidé de privilégier la maintenance des différents lieux de travail de leur entreprise, en particulier dans le cadre de l'entretien et du nettoyage des équipements de travail, afin de limiter le risque de blessure par projection. Les exosquelettes se différencient également en fonction de la partie du corps qu'ils visent à assister : membres supérieurs, des membres inférieurs ou les deux.

Dans ce contexte, l'utilisation d'un exosquelette susceptible d'apporter une réponse adaptée aux contraintes physiques spécifiques aux salariés les rendant susceptibles de la situation de travail et de l'occupation humaine concernée (1).

NT 62

**Exosquelettes au travail : 6 points de vigilance**

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

Les exosquelettes ont des avantages mais ils peuvent aussi présenter des risques. Il est donc essentiel de prendre en compte les points de vigilance suivants :

1. La posture : les exosquelettes ne peuvent pas corriger la posture de l'opérateur. Une mauvaise posture peut entraîner des douleurs et des blessures.
2. Le rythme cardiaque : l'utilisation d'un exosquelette peut augmenter le rythme cardiaque, ce qui peut être dangereux pour les personnes souffrant de problèmes cardiovasculaires.
3. Le dos : les exosquelettes ne peuvent pas protéger le dos. Une mauvaise utilisation peut entraîner des douleurs et des blessures.
4. La respiration : certains exosquelettes peuvent gêner la respiration, ce qui peut être dangereux pour les personnes souffrant de problèmes respiratoires.
5. La vision : certains exosquelettes peuvent gêner la vision, ce qui peut être dangereux pour les personnes travaillant dans des environnements complexes.
6. L'équilibre : certains exosquelettes peuvent gêner l'équilibre, ce qui peut être dangereux pour les personnes travaillant dans des environnements instables.

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

Infographie

# Une offre d'information complète

## → Agir en entreprise

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

Structurer sa démarche d'acquisition et d'intégration

Evaluer l'acceptabilité / Accompagner l'acceptation

Rôle des services de santé



**Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise**  
Guide pour les préventeurs

ED 6315

**Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : évaluation par questionnaire**  
ANNEXE 2 Questionnaire pour les utilisateurs ou ex-utilisateurs

TF 274

**Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculo-squelettiques et rôle des services de santé au travail**

TC 175

**Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel**

ED 6416

Vidéo dessinée

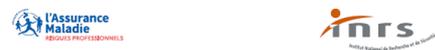


# Complémentarités des méthodes



**Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise**  
Guide pour les préventeurs

ED 6315



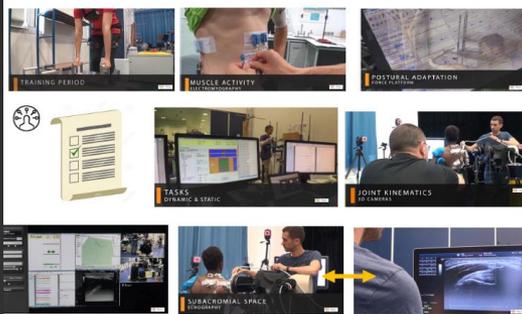
Moyens de prévention | Outils de travail



**Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel**

ED 6416

**Expérimentations**  
Laboratoire de biomécanique / INRS



TRAINING PERIOD, MUSCLE ACTIVITY, POSTURAL ADAPTATION, TASKS DYNAMIC & STATIC, JOINT KINEMATICS, SURACROMIAL SPACE

**Exemples de tâches de travail**

**Tâches impliquant le maintien statique (ou quasi-statique) des bras en hauteur**

Il peut s'agir par exemple, de tâches de manipulation d'outils (perceuse, visseuse...) sur des surfaces en hauteur (pontage, peinture, travail sous caisse...) (voir figure 7).

Cette typologie de tâches est régulièrement rencontrée dans les secteurs de la logistique, de l'ÉTP, de l'agriculture ou de l'industrie. Les principales contraintes musculaires associées concernent généralement les muscles élévateurs des bras, au niveau des épaules, dans des conditions quasi-statiques (faible amplitude de mouvement).

**Tâches impliquant le maintien statique (ou quasi-statique) du tronc en position inclinée vers l'avant**

Ces tâches consistent à déplacer ou conditionner des charges stockées en position basse. Elles peuvent également concerner la manipulation d'outils dans des espaces de travail restreints. Cette typologie de tâches est fréquemment rencontrée dans les secteurs de la logistique ou de l'ÉTP, mais également dans l'industrie, ou lors d'opérations de maintenance. Les principales contraintes associées concernent généralement les muscles du dos, responsables du redressement du buste, dans des conditions statiques ou quasi-statiques (faibles amplitudes de mouvement) (voir figure 2).

**Tâches dynamiques de maintenance manuelle d'une charge**

Ces tâches se traduisent le plus souvent par le déplacement latéral ou vertical d'une charge. Cette typologie de tâches est fréquemment rencontrée dans les secteurs de l'ÉTP ou de la logistique, par exemple. Sur un plan biomécanique, ce

Étape 1 - Caractériser la tâche de travail



Figure 1



Figure 2

**PHASE 1 Aide à la décision**

Étape 1	<p>► Analyse de la charge physique de travail et recherche de pistes de prévention</p> <p>Attendez : - Identifier les situations de travail qui peuvent bénéficier de solutions de prévention collectives et organisationnelles</p> <p>- Identifier les tâches qui peuvent bénéficier d'une assistance physique spécifique</p>
Étape 2	<p>► Description détaillée des tâches pouvant bénéficier d'une assistance physique spécifique</p> <p>Attendez : - Identifier les caractéristiques spécifiques des tâches sélectionnées</p>
Étape 3	<p>► Validation collective des caractéristiques de l'exosquelette</p> <p>Attendez : - Lister des critères objectifs à intégrer au cahier des charges</p> <p>- S'accorder sur l'exosquelette le plus adapté</p>

**Choix d'un exosquelette potentiellement adapté**

Étape 3 - Les conséquences biomécaniques de l'usage de l'exosquelette

ou quasi-statique du tronc en position inclinée vers l'avant et les tâches dynamiques de maintenance manuelle de charge impliquent une flexion-extension du tronc (voir étape 1)

**Exosquelettes souples**

Cette catégorie d'exosquelette propose une assistance à la flexion du dos pour répondre aux principales sollicitations liées aux tâches impliquant une inclinaison du tronc. La conception repose sur des matériaux élastiques souples, de type tendu. L'action des muscles extenseurs du dos (lombaires) doit donc être évaluée en priorité. Les résultats sont présentés pour deux tâches distinctes :

- tâches impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, du tronc en position fortement inclinée vers l'avant (figure 9) : ce type d'exosquelette flexible réduit légèrement (5 à 10 %) les contraintes lombaires sur une grande partie de la plage angulaire tendue (de 5 à 85° d'inclinaison).
- tâches dynamiques de maintenance impliquant une flexion-extension du tronc (figure 10) : les bénéfices de ce type d'exosquelette sur les muscles lombaires sont observés dans ce cas sur une plage angulaire de 5 à 50°.

L'amplitude des bénéfices varie de 5 à 10 % en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc.

Lors de la tâche dynamique impliquant une rotation du tronc, cette catégorie d'exosquelette ne semble pas indiquer. Il existe une légère augmentation des contraintes au niveau des muscles extenseurs du dos, en particulier lorsque les opérateurs sont en position quasi-verticale (figure 10).

**Exosquelettes rigides**

Tout comme la précédente, cette catégorie d'exosquelette propose une assistance lors des tâches impliquant une flexion du tronc. L'action des muscles extenseurs du dos (lombaires) doit donc également être évaluée en priorité. Les résultats sont ici présentés pour deux tâches distinctes :

- tâches impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, du tronc en position fortement inclinée vers l'avant : cette catégorie d'exosquelette rigide d'assistance du dos (figure 11) ne semble pas indiquer pour la réduction de cette tâche. En effet, pour de



Figure 9



Figure 10



Figure 11

# Complémentarités des méthodes et des outils

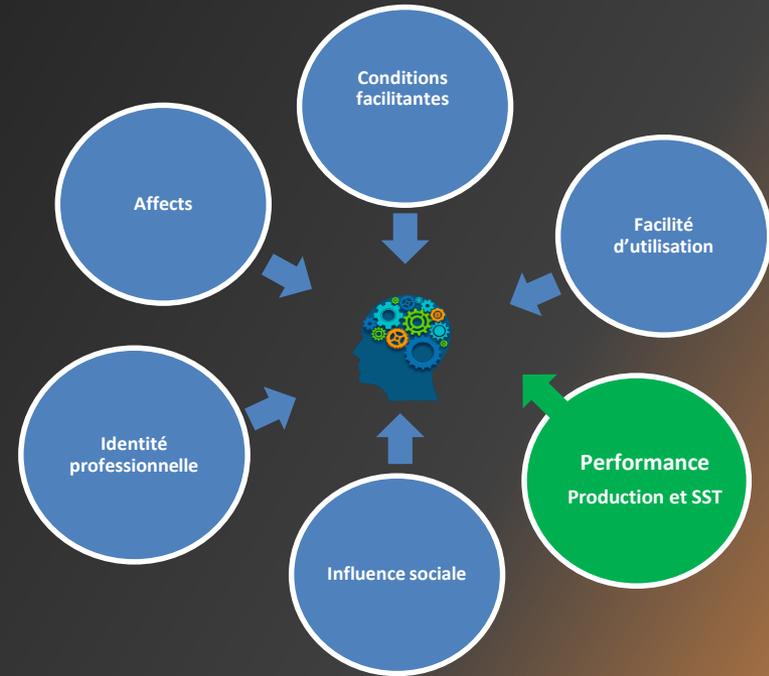


Acceptance of Exoskeletons: Questionnaire Survey  
Wieland & al, 2019



Acceptabilité

Acceptation



Modèle de l'acceptation (INRS)



Moyens de prévention / Équipements / Outils de travail

ED 6416

**Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel**

ED 6416

**Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise**  
Guide pour les préventeurs

ED 6315

**Expérimentations**  
Laboratoire de biomécanique / INRS

**PHASE 1 Aide à la décision**

**Exemples de tâches de travail**

**Tâches impliquant le maintien statique (ou quasi-statique) des bras en hauteur**

Il peut s'agir, par exemple, de tâches de manipulation d'outils (perceuses, visseuses...) sur des surfaces en hauteur (ponçage, peinture, travail sous tension...) (voir Figure 1).

Cette typologie de tâche est régulièrement rencontrée dans les secteurs de la logistique, du BTP, de l'agriculture ou de l'industrie. Les principales contraintes musculaires associées concernent généralement les muscles stabilisateurs des bras, au niveau des épaules, dans des conditions quasi-statiques (faible amplitude de mouvement).

**Tâches impliquant le maintien statique (ou quasi-statique) du tronc en position inclinée vers l'avant**

Ces tâches consistent à déplacer ou conditionner des charges stockées en position basse. Elles peuvent également concerner la manipulation d'outils dans des espaces de travail restreints. Cette typologie de tâche est fréquemment rencontrée dans les secteurs de la logistique ou du BTP, mais également dans l'industrie, ou lors d'opérations de maintenance. Les principales contraintes associées concernent généralement les muscles du dos, responsables du redressement du bassin, dans des conditions statiques ou quasi-statiques (faibles amplitudes de mouvement) (voir Figure 2).

**Tâches dynamiques de manutention manuelle d'une charge**

Ces tâches se traitent le plus souvent par le déplacement latéral ou vertical d'une charge. Cette typologie de tâche est fréquemment rencontrée dans les secteurs du BTP, ou de la logistique, par exemple. Sur un plan biomécanique, on

**Figure 1 - Caractériser la tâche de travail**

**Figure 2**

PHASE 1 Aide à la décision	
Étape 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analyse de la charge physique de travail et recherche de pistes de prévention</li> <li>Attendus :               <ul style="list-style-type: none"> <li>Identifier les situations de travail qui peuvent bénéficier de solutions de prévention collectives et organisationnelles</li> <li>Identifier les tâches qui peuvent bénéficier d'une assistance physique spécifique</li> </ul> </li> </ul>
Étape 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Description détaillée des tâches pouvant bénéficier d'une assistance physique spécifique</li> <li>Attendus :               <ul style="list-style-type: none"> <li>spécifier les caractéristiques spécifiques des tâches sélectionnées</li> </ul> </li> </ul>
Étape 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Validation collective des caractéristiques de l'exosquelette</li> <li>Attendus :               <ul style="list-style-type: none"> <li>Lister des autres objectifs à intégrer au cahier des charges</li> <li>S'accorder sur l'exosquelette le plus adapté</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Choix d'un exosquelette potentiellement adapté</b></p>

**Étape 3 - Les conséquences bénéfiques de l'usage de l'exosquelette**

ou quasi-statique du tronc en position inclinée vers l'avant, et les tâches dynamiques de manutention manuelle de charge impliquent une flexion/extension du tronc (voir étape 1)

**Exosquelettes souples**

Cette catégorie d'exosquelette propose une assistance à la flexion du dos pour répondre aux principales sollicitations dans des tâches impliquant une inclinaison du tronc. La conception repose sur des matériaux élastiques souples, de type feuille. Caractérisés des muscles extenseurs du dos (Serratus) doit donc être évaluée en priorité. Les résultats sont présentés pour deux tâches distinctes :

- tâches impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, du tronc en position fortement inclinée vers l'avant (Figure 8) ; on type d'exosquelette flexible réduit légèrement (5 à 10 %) les contraintes lombaires sur une grande partie de la plage angulaire basale (de 5 à 80° d'inclinaison).
- tâches dynamiques de manutention impliquant une flexion/extension du tronc (Figure 10) : les bénéfices de ce type d'exosquelette sur les muscles lombaires sont observés dans ce cas sur une plage angulaire de 5 à 50°.

La longueur des bénéfices varie de 5 à 10 % en fonction de l'angle d'inclinaison du tronc.

Lors de la tâche dynamique impliquant une extension du tronc, cette catégorie d'exosquelette ne semble pas indiquer. Il induit une légère aggravaation des contraintes au niveau des muscles extenseurs du dos, en particulier lorsque les opérateurs sont en position quasi-verticale (Figure 10).

**Exosquelettes rigides**

Tout comme la précédente, cette catégorie d'exosquelette propose une assistance lors des tâches impliquant une flexion du tronc. Toutefois, des muscles extenseurs du dos (Serratus) doit donc également être évaluée en priorité. Les résultats sont présentés pour deux tâches distinctes :

- tâches impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, du tronc en position fortement inclinée vers l'avant : cette catégorie d'exosquelette rigide d'assistance du dos (Figure 11) ne semble pas indiquer pour la réalisation de cette tâche. En effet, pour de

**Figure 8**

**Figure 10**

**Figure 11**



**Projet de norme NF X35-800 « Recommandations ergonomiques pour l'intégration des dispositifs et robots d'assistance physique (DAP et RAP) à contension »**

# CONTRIBUTION À LA NORMALISATION

**afnor**  
NORMALISATION

## PF EXOSK « Evaluation de l'interaction Homme-Exosquelettes »

Date :  
2021-09-15

### LA NORME que vous appliquez dans votre entreprise, C'EST VOUS QUI LA REDIGEZ !

La normalisation concerne tout type d'entreprise, sans critère de taille, dans tous les secteurs d'activité.

Participer directement au développement des normes, c'est contribuer à définir les règles volontaires de votre secteur. C'est se doter d'un puissant levier pour orienter le marché en faveur des pratiques qui vous semblent préférables.

Vous êtes le réseau d'experts sur lequel AFNOR s'appuie pour défendre les intérêts français au cœur des structures de normalisation européenne (CEN-CENELEC) et internationale (ISO-IEC). Son influence y est à la fois technique et stratégique, essentielle pour les entreprises françaises car 90% des normes que vous utilisez sont d'origine mondiale ou européenne.

### Contexte et enjeux

Les évolutions technologiques récentes ont permis de faire apparaître de nouveaux systèmes d'assistance physique à contention issus de l'origine du monde médical qui peuvent, soit constituer une alternative à l'automatisation de tâches pénibles, soit répondre à des situations restées jusqu'à maintenant sans solution satisfaisante, soit aider le retour au travail de personnes à capacités fonctionnelles réduites ; ces dispositifs d'assistance physique ou exosquelettes sont des structures externes revêtues par un utilisateur et destinées à la réduction de la charge physique et des facteurs de risques biomécaniques de TMS.

Aujourd'hui le déploiement de dispositifs ou robots d'assistance physiques de types exosquelettes se fait dans de multiples domaines (industrie, logistique, transport, BTP, travaux agricoles ou forestiers, militaire, maintenance, aide à la personne, sécurité civile, rééducation, loisirs...).

Pour évaluer l'interaction de ces nouveaux systèmes d'assistance physique à contention avec les hommes qui en sont équipés (réponse au besoin d'assistance, acceptabilité par l'utilisateur, obtention de la performance attendue de l'utilisateur...), que ce soit au stade de leur conception ou au stade de l'achat par les utilisateurs, il devient indispensable de proposer aux acteurs concernés (concepteurs, opérateurs et utilisateurs) des méthodes adaptées et partagées, afin d'en maîtriser les enjeux.

Depuis 2017, une Plateforme d'échange et d'expérimentations rassemble divers acteurs ayant la volonté de présenter des cas d'usages d'exosquelettes, et de partager sur les bonnes pratiques et les méthodes déployées pour en faciliter l'intégration.

L'esprit de cercle de rencontres professionnelles s'appuyant sur la force du réseau était né !

**afnor**  
NORMALISATION

- Les travaux se déroulent sur le plan exclusivement national, l'objectif étant de développer des fiches de présentation de cas d'usages et des pratiques de prévention.
- Suivant les stratégies d'intégration et de déploiement des résultats des travaux, le groupe verse les synthèses et les recommandations collectées dans la commission de normalisation existante.
- Il suit également l'évolution des travaux européens en la matière

# NORMALISATION 2015-----2022

# Assistances, conseils

Méthodes / Suivi / Recherche

INDUSTRIE

BTP



Validité  
opérationnelle



IDÉOS

Innovation Un exosquelette pour aider les soignants

19/20

Lorraine



M

erci pour votre attention