

## CONCOURS INTERNE D'INGÉNIEUR TERRITORIAL

SESSION 2025

ÉPREUVE DE NOTE

ÉPREUVE D'ADMISSIBILITÉ :

Rédaction d'une note à partir d'un dossier portant sur la spécialité choisie par le candidat au moment de son inscription.

Durée : 4 heures  
Coefficient : 3

**SPÉCIALITÉ : PRÉVENTION ET GESTION DES RISQUES**

### À LIRE ATTENTIVEMENT AVANT DE TRAITER LE SUJET :

- ♦ Vous ne devez faire apparaître aucun signe distinctif dans votre copie, ni votre nom ou un nom fictif, ni initiales, ni votre numéro de convocation, ni le nom de votre collectivité employeur, de la commune où vous résidez ou du lieu de la salle d'examen où vous composez, ni nom de collectivité fictif non indiqué dans le sujet, ni signature ou paraphe.
- ♦ Sauf consignes particulières figurant dans le sujet, vous devez impérativement utiliser une seule et même couleur non effaçable pour écrire et/ou souligner. Seule l'encre noire ou l'encre bleue est autorisée. L'utilisation de plus d'une couleur, d'une couleur non autorisée, d'un surligneur pourra être considérée comme un signe distinctif.
- ♦ Le non-respect des règles ci-dessus peut entraîner l'annulation de la copie par le jury.
- ♦ Les feuilles de brouillon ne seront en aucun cas prises en compte.

**Ce sujet comprend 37 pages.**

**Il appartient au candidat de vérifier que le document comprend le nombre de pages indiqué.**

*S'il est incomplet, en avertir le surveillant.*

Ingénieur territorial, vous êtes chef de projet « prévention des risques professionnels » au sein de la direction de services techniques de la ville d'Ingéville (65 000 habitants).

Les organisations syndicales ont récemment interpellé les membres du comité social territorial (CST) sur les troubles musculo-squelettiques touchant les agents de la voirie, de l'assainissement, des espaces verts et des bâtiments. En conséquence, la direction générale a décidé de lancer une démarche de prévention. Elle s'interroge notamment sur l'opportunité de recourir aux exosquelettes afin de lutter contre ces troubles.

Dans un premier temps, la directrice générale des services techniques (DGST) vous demande de rédiger à son attention, exclusivement à l'aide des documents joints, une note sur les exosquelettes et leurs enjeux en matière de prévention des risques professionnels.

**10 points**

Dans un deuxième temps, elle vous demande d'établir un ensemble de propositions opérationnelles en vue de mener une expérimentation d'exosquelettes au sein de la direction des services techniques d'Ingéville.

*Pour traiter cette seconde partie, vous mobiliserez également vos connaissances.*

**10 points**

#### Liste des documents :

- Document 1 :** « Les exosquelettes et la prévention des troubles musculo-squelettiques » - *Centre de gestion de l'Isère de la Fonction Publique Territoriale* - août 2024 - 3 pages
- Document 2 :** « Les conséquences de l'utilisation d'exosquelettes en termes de sécurité et de santé au travail » (extrait) - *European Agency for Safety and Health at Work* - 2019 - 9 pages
- Document 3 :** « La révolution des exosquelettes aura-t-elle lieu ? » - Stéphane Desmichelle - *scienceetavenir.fr* - 6 décembre 2017 - 2 pages
- Document 4 :** « Les exosquelettes entrent timidement dans les usines » - Emmanuel Guimard - *lesechos.fr* - 6 juin 2018 - 1 page
- Document 5 :** « Note scientifique et technique. Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention » (extraits) - Jean-Jacques Atain Kouadio et Adel Sghaier - *Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS)* - octobre 2017 - 6 pages
- Document 6 :** « La prévention des risques professionnels des exosquelettes » - *officiel-prevention.com* - juin 2018 - 3 pages
- Document 7 :** « Dossier : les exosquelettes » (extraits) - *Travail & sécurité n°810* - novembre 2019 - 7 pages

- Document 8 :** « Les agents municipaux peuvent s'équiper d'exosquelettes » - Esther Suraud - *Sud Ouest* - 25 octobre 2024 - 1 page
- Document 9 :** « Des hommes bioniques dans nos jardins » - Sophie Palisse - *Techni.Cités* - 29 avril 2020 - 2 pages

**Documents reproduits avec l'autorisation du C.F.C.**

*Certains documents peuvent comporter des renvois à des notes ou à des documents non fournis car non indispensables à la compréhension du sujet.*

*Dans un souci environnemental, les impressions en noir et blanc sont privilégiées. Les détails non perceptibles du fait de ce choix reprographique ne sont pas nécessaires à la compréhension du sujet, et n'empêchent pas son traitement.*

# Les exosquelettes et la prévention des troubles musculo-squelettiques

Août 2024

Dans la lutte contre les troubles musculo-squelettiques, les exosquelettes apparaissent comme une solution technologique novatrice sur laquelle repose beaucoup d'espoirs.

Développé depuis quelques années, l'engouement pour cette technologie ne fait que croître.

Dans ce contexte, il est important de se questionner sur l'usage, l'efficacité et les risques liés à l'utilisation des exosquelettes. Aujourd'hui, une collectivité a-t-elle un intérêt à s'équiper ? Si oui, comment peut-elle intégrer cette technologie ?

## 1. Qu'est-ce qu'un exosquelette ?

Un exosquelette est une structure de contention, externe, mécanique ou textile, qui apporte une assistance physique à son utilisateur, par une compensation de ses efforts ou une augmentation de ses capacités motrices. Il existe deux types d'exosquelettes :

- Les robots d'assistance physiques avec contention ; qui sont des machines et qui intègrent à la fois un système de mécaniques qui permet le mouvement et un dispositif de commande par détection de l'intention de mouvement.
- Les dispositifs d'assistances physiques avec contention ; qui sont portés par l'utilisateur et qui fonctionnent par un système de restitution d'énergie, par le biais d'élastiques, de ressorts ou de pneumatiques.



Crédit photos - Freepik

## 2. A quoi sert un exosquelette ?

Un exosquelette peut permettre de soulager une ou plusieurs contraintes de force, qui sont un des facteurs de risque biomécaniques à l'origine des troubles musculo-squelettiques (TMS).

En revanche, l'exosquelette n'est en aucun cas une réponse exhaustive et universelle à la problématique des TMS.

En effet les facteurs de risques biomécaniques sont nombreux : l'effort, la posture, la répétitivité du geste, l'organisation du travail, les risques psychosociaux (RPS). L'impact de l'exosquelette ne peut qu'être limité à certains de ces facteurs.

Par ailleurs, l'exosquelette n'augmente pas la force d'une personne, il ne permettra en aucun cas de dépasser les limites au port de charge manuel.

L'exosquelette n'est pas non plus un équipement de protection individuelle : sa capacité de réduction d'un risque professionnel n'a pas été certifiée ni démontrée.

### 3. Quelle est son efficacité ?

L'efficacité des exosquelettes est difficile à évaluer en raison du manque de recul que l'on a sur cette technologie.

Par ailleurs, les technologies utilisées et les parties du corps concernées par les exosquelettes sont extrêmement variées.

Enfin certains exosquelettes agissent sur des efforts statiques alors que d'autres agissent sur des efforts dynamiques (par exemple un modèle d'assistance pour réaliser le ponçage des plafonds ou un modèle destiné à la manutention et au déplacement des charges).

Ces caractéristiques rendent les comparaisons difficiles et ne permet pas d'apporter une réponse unique à la question de l'efficacité.

Cependant, les premières études tendent à montrer :

- une réduction des efforts dont le niveau est variable et difficile à anticiper (de 10 à 60 %, selon l'INRS) sur la partie du corps spécifiquement prévue par l'équipement ;
- une augmentation de l'effort sur cette même partie du corps si l'exosquelette est utilisé dans des conditions de plus grande amplitude ou en rotation alors qu'il n'est pas prévu pour ;
- un transfert de l'effort sur d'autres parties du corps, en particulier si l'exosquelette n'est pas relié au sol.

### 4. Quels sont les risques liés à l'utilisation des exosquelettes ?

Les exosquelettes génèrent des risques professionnels qui peuvent s'ajouter aux situations de travail initiales.

#### a) Les risques spécifiques aux robots d'assistance physiques qui sont des machines :

- Collision, coincement, cisaillement,
- Chute et perte d'équilibre,
- Dépassement des limites articulaires,
- Thermiques.

#### b) Les risques liés à la charge physique, pour l'ensemble des exosquelettes :

- Standardisation du geste,
- Fonte musculaire,
- Sur-sollicitation locale (force, amplitude, répétitivité, travail statique),
- Déplacement des contraintes (vers les zones d'accroche de l'exosquelette par exemple),
- Port de charge supplémentaire (poids de l'exosquelette),
- Equilibre et proprioception (perception de son corps dans l'espace).

#### c) Les risques psychosociaux, pour l'ensemble des exosquelettes :

- Intensification du travail,
- Augmentation de la complexité du travail (réduction de la précision des gestes ; augmentation de l'attention ; réduction de la capacité de surveillance ; réduction de la mobilité),
- Perte de contrôle sur le travail,
- Dépendance/concurrence avec le robot,
- Acceptation sociale et collective.

Par ailleurs, les exosquelettes peuvent accentuer des risques déjà existants.

L'ensemble de ces risques doivent ainsi être évalués et intégrés dans la démarche d'acquisition d'un exosquelette et selon la logique des principes généraux de prévention des risques.

## 5. Comment acquérir un exosquelette ?

L'INRS (Institut national de recherche et de sécurité) propose un plan d'action aidant à l'acquisition et à l'intégration d'un exosquelette en trois étapes :

### ↪ Aide à la décision

- Analyse de la charge physique de travail et recherche de pistes de prévention :
  - Identifier les situations de travail pour lesquelles des solutions de prévention collectives et organisationnelle pourraient être envisagées,
  - Identifier les tâches qui peuvent bénéficier d'une assistance physique spécifique.
- Description détaillée des tâches qui pourraient bénéficier d'une assistance physique spécifique :
  - Identifier les caractéristiques spécifiques des tâches concernées.
- Validation collective des caractéristiques de l'exosquelette :
  - Lister des critères à intégrer au cahier des charges,
  - S'accorder sur le choix de l'exosquelette le plus adapté.

### ↪ Evaluation de l'interaction homme-exosquelette

- Introduction des critères et des outils d'évaluation :
  - Comprendre les critères d'évaluation,
  - Sélectionner des outils d'évaluation.
- Elaboration du protocole d'évaluation :
  - S'inscrire dans un protocole structuré.
- Apprentissage hors situation réelle de travail :
  - Se familiariser avec l'exosquelette et effectuer l'apprentissage de la tâche et de son environnement,
  - Décider de la nécessité de poursuivre l'évaluation en situation réelle de travail.
- Mise en œuvre en situation réelle de travail :
  - Faire l'apprentissage approfondi de l'utilisation de l'exosquelette,
  - Valider ou non l'intégration définitive de l'exosquelette en fonction des résultats de l'évaluation.

### ↪ Retours d'expériences

- Introduction des critères et des outils d'évaluation :
  - Mener des retours d'expériences à court, moyen et long terme sur l'usage de l'exosquelette sur la santé et la sécurité des utilisateurs, en fonction des évolutions des situations de travail.

Pour plus d'informations, se référer à la brochure INRS ED6315 : acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise - Guide pour les préventeurs.

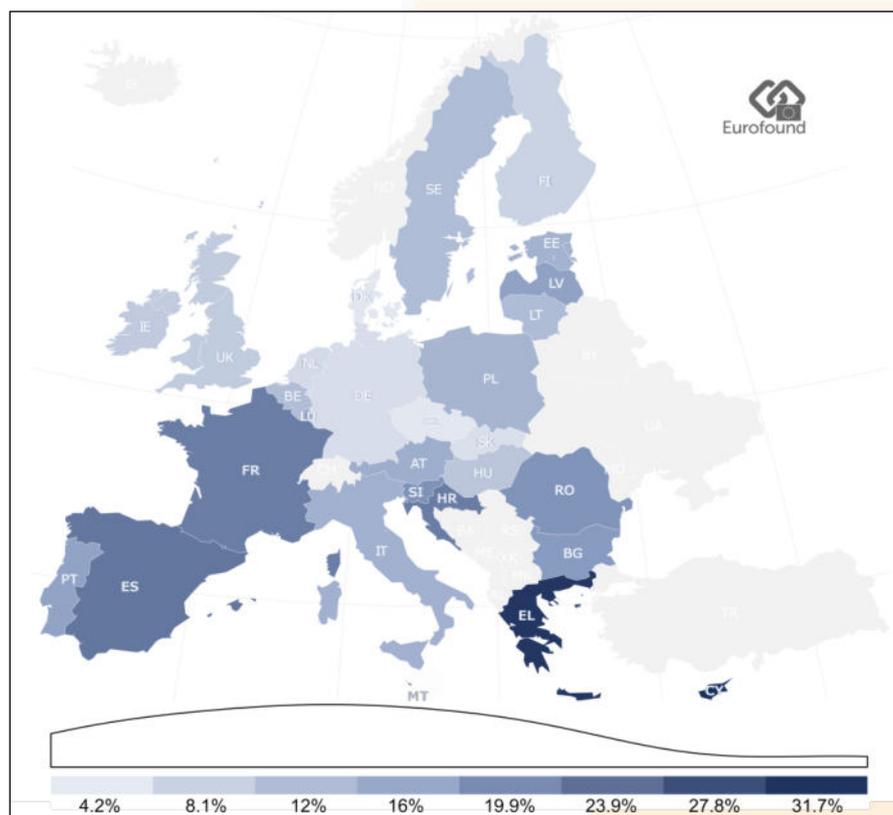
2019

## LES CONSÉQUENCES DE L'UTILISATION D'EXOSQUELETTES EN TERMES DE SÉCURITÉ ET DE SANTÉ AU TRAVAIL *(extrait)*

### Introduction

Ces dernières années, de nouveaux dispositifs d'assistance portables, les «exosquelettes» ont fait leur apparition sur le lieu de travail. Leur utilisation devrait se généraliser à l'avenir, des prototypes d'exosquelettes ayant démontré leurs bénéfices dans des domaines tels que les soins médicaux. Les exosquelettes semblent en particulier offrir une nouvelle approche pour s'attaquer au problème des troubles musculosquelettiques liés au travail (TMLT). Ces derniers constituent l'un des problèmes les plus aigus auxquels sont confrontés les lieux de travail en Europe<sup>1</sup>. La figure 1 montre les pourcentages de travailleurs ayant des positions fatigantes et douloureuses au travail, éventuellement liées à une mauvaise conception du lieu de travail, les conditions de travail demeurant un problème majeur dans toute l'Europe. Des exosquelettes ont été développés pour remédier à ce problème.

Figure 1 Pourcentages de salariés en Europe travaillant dans des positions fatigantes ou douloureuses (adapté d'Eurofound 2019)



<sup>1</sup> Plus de 40 % des travailleurs en Europe souffrent de douleurs lombaires ou de douleurs aux épaules. En outre, 63 % des travailleurs effectuent des tâches répétitives ou travaillent fréquemment (46 %) dans des positions à risque (Eurofound, 2012). Les coûts annuels engendrés par les problèmes de santé liés à ces conditions de travail s'élèvent à environ 2 % du produit intérieur brut de l'Union européenne (UE) (Bevan, 2015). Nombre de ces problèmes sont causés par des tâches de manutention manuelle, parmi lesquelles le levage, l'abaissement, le soutien ou le port de charges (Zurada, 2012; Collins and O'Sullivan, 2015). Travailler en position de torsion, de flexion ou en maintenant les bras au-dessus de la tête augmente également le risque de développer des troubles liés au travail. Les TMSLT constituent donc non seulement un problème de santé, mais aussi un enjeu économique central.

Les exosquelettes sont des dispositifs portables qui permettent de soutenir le système musculo-squelettique en utilisant différents principes mécaniques. Ils peuvent réduire les contraintes musculaires dans les parties du corps souvent sollicitées, comme le bas du dos ou les épaules. Les exosquelettes pourraient présenter des bénéfices importants pour la prévention des TMSLT, mais il est aussi nécessaire de considérer les nouvelles questions que pose l'utilisation de ces dispositifs d'assistance sur le plan de la santé et de la sécurité au travail (SST). L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles a publié une vue d'ensemble des nouveaux facteurs de risque rencontrés sur les lieux de travail utilisant des exosquelettes (INRS, 2019). D'une part, les exosquelettes peuvent être considérés comme une opportunité de réduire les contraintes musculaires au travail en assistant les travailleurs sur le plan physique et en prévenant potentiellement les TMSLT ou en aidant les travailleurs ayant une déficience physique. D'autre part, de nouveaux risques potentiels pour la santé pourraient résulter de l'apparition de nouvelles contraintes sur d'autres parties du corps. La motricité, la stabilité des articulations et la cinématique subissent également des incidences (INRS, 2018). En outre, la conception ergonomique du lieu de travail, axée sur l'humain, risque d'être négligée. Mais il y a de nombreux lieux de travail qui ne sont pas liés à un site spécifique (par exemple, la livraison de meubles ou les secours d'urgence) et où des mesures ergonomiques ne peuvent donc pas être mises en œuvre en raison de la variabilité de l'environnement et de ses exigences (Schick, 2018). De plus, dans ces professions, les sollicitations musculaires excessives, les levages fréquents, les postures inappropriées ou des équipements de protection individuelle (EPI) lourds peuvent augmenter le risque de surmenage physique. Dans ce contexte, les exosquelettes peuvent offrir des possibilités d'amélioration des conditions de travail.



Inc/MONOPOLY919, ©Shutterstock

Il est essentiel de faire preuve de prudence en cas d'utilisation d'une technologie à proximité voire au contact du corps humain. Avant de prévoir d'équiper les employés d'exosquelettes, il faudrait envisager des mesures techniques et organisationnelles au niveau de la conception du lieu de travail. De manière générale, l'usage d'exosquelettes ne devrait être envisagé qu'en dernier recours pour améliorer l'ergonomie des lieux de travail. On dispose actuellement de peu de données scientifiques en matière d'ergonomie et de science du travail en ce qui concerne les exosquelettes. La compréhension des effets à long terme des exosquelettes sur la biomécanique et la physiologie humaines est un défi difficile à réaliser dans la pratique (Liedtke et Glitsch, 2018), car il faut tenir compte du type d'exosquelette, de la nature des tâches à effectuer et des périodes d'application. De plus, l'étude des effets sur la santé

liés aux aspects physiologiques ou biomécaniques ne fait que commencer: les interactions humaines avec les exosquelettes sont complexes et leur examen exige beaucoup de temps. Mais de nouvelles approches doivent être développées pour démontrer l'efficacité des exosquelettes, afin de mieux appréhender les avantages et les inconvénients de cette technologie. Cet article donne un aperçu des discussions en cours en ce qui concerne l'utilisation et l'évaluation des exosquelettes en termes de santé et de sécurité au travail (SST).

## Exosquelettes

### Définition

Un exosquelette peut être défini comme un dispositif d'assistance à la personne qui agit de façon mécanique sur le corps (Liedtke et Glitsch, 2018). Dans une acception plus étroite, il s'agit de technologies robotiques portables qui modulent les forces internes ou externes s'exerçant sur le corps. En bref, les exosquelettes sont des dispositifs portables qui renforcent ou assistent les efforts de l'utilisateur. Compte tenu du grand nombre d'applications et de fonctionnalités différentes, il n'existe pas encore de définition commune. Selon un consensus général, les exosquelettes sont définis dans la littérature comme des structures mécaniques externes portées sur le corps (Herr, 2009; De Looze et al., 2016). Ils peuvent être classés en systèmes actifs ou passifs.

Les exosquelettes actifs utilisent des actionneurs (composants mécaniques d'entraînement) pour assister les mouvements humains. Ces composants mécaniques sont constitués de moteurs électriques mais il existe aussi des systèmes d'activation hydrauliques ou pneumatiques (Gopura et Kiguchi, 2009). Ils apportent donc une force supplémentaire et augmentent ainsi les performances de l'opérateur. S'agissant des exosquelettes passifs, ils utilisent la force de rappel des ressorts, amortisseurs ou autres matériels pour assister le mouvement humain. L'énergie stockée dans un dispositif passif est générée exclusivement au cours des mouvements de l'utilisateur (De Looze et al., 2016). De plus, la nouvelle répartition des forces vise à protéger certaines parties du corps. La modification des performances de l'utilisateur n'est pas due au renforcement de sa force physique, mais à sa capacité de maintenir des positions éprouvantes plus longtemps, par exemple en travaillant avec les bras relevés au-dessus de la tête.

Les exosquelettes hybrides, qui peuvent être actifs ou passifs, sont encore rares. Ils se basent sur l'activité des ondes cérébrales (signaux EEG) ou l'activation musculaire pour déclencher les mouvements. Étant peu susceptibles d'être utilisés dans l'industrie, ils ne seront pas abordés plus en détail dans ce document.

### Types d'exosquelettes

Les exosquelettes peuvent être classés en trois groupes: membres inférieurs, membres supérieurs et corps entiers. La littérature mentionne des exosquelettes conçus pour interagir avec une seule articulation (Gams et al., 2013), mais ils ne seront pas abordés plus avant dans le présent article en raison de leur spécificité individuelle et de leur application dans des cas uniques. Les exosquelettes des membres supérieurs utilisent généralement de solides structures mécaniques pour répartir les forces exercées sur les membres supérieurs et le torse (par exemple, bras, avant-bras, épaules ou bas du dos). De fait, cette répartition des forces implique de nouvelles sollicitations pour d'autres parties du corps, comme les hanches ou les jambes. Les exosquelettes des membres inférieurs peuvent transférer les forces vers le sol et réduire ainsi la charge sur le système musculosquelettique. Il est toutefois important de noter que ces principes dépendent dans une large mesure de la conception et de la fonctionnalité de l'exosquelette. Les dispositifs d'assistance destinés à soulager à la fois les membres supérieurs et les membres inférieurs peuvent être définis comme des exosquelettes du corps entier.

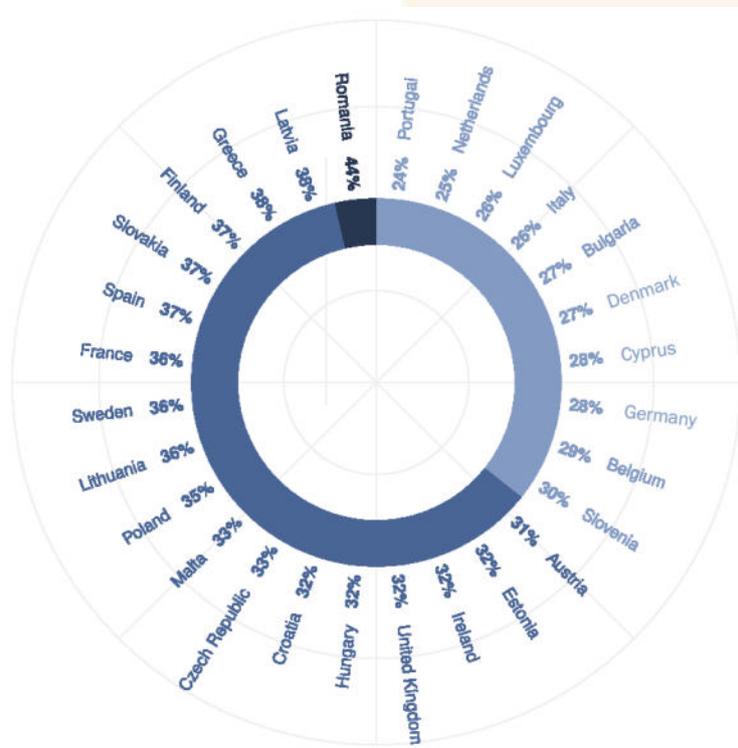
### Domaines d'application sur les lieux de travail

L'idée d'assister les mouvements humains par des dispositifs techniques n'est pas récente. Des dispositifs portables tels les exosquelettes sont utilisés depuis longtemps dans le cadre des soins médicaux, comme par exemple des orthèses de rééducation pour aider les patients blessés à retrouver

leurs capacités physiques (Viteckova et al., 2013). Cependant, les orthèses se différencient des exosquelettes, car elles servent à soulager les personnes souffrant de pathologies musculo-squelettiques. Des exosquelettes ont également été développés pour des applications militaires (De Looze et al., 2016). Mais l'utilisation d'exosquelettes pour entretenir ou préserver la santé physique des travailleurs est une pratique nouvelle. Bien que l'usage de dispositifs d'assistance comme les exosquelettes pour améliorer l'ergonomie des conditions de travail soit controversé, il offre de nouvelles possibilités pour la santé et la sécurité des employés (Schick, 2018). En outre, les exigences en matière d'ergonomie des postes de travail seront déterminantes à l'avenir pour assurer la santé physique d'une main-d'œuvre vieillissante en raison de l'évolution démographique. De ce point de vue, il est donc essentiel de développer de nouveaux outils ergonomiques, l'offre étant actuellement limitée (Hensel et al., 2018; Schick, 2018).

Il existe de nombreux domaines d'application des exosquelettes aux fins de la réduction des TMSLT. Dans toute l'Europe, plus de 30 % des tâches professionnelles sont associées à la manutention manuelle (Eurofound, 2012), qui représente un risque majeur pour la santé. Les activités qui impliquent des tâches répétitives, la manipulation de charges lourdes, le travail avec les bras relevés au-dessus de la tête ou avec des postures à risque sont autant de possibilités de mettre en œuvre des exosquelettes. La figure 2 montre que le déplacement et le port de charges lourdes représentent une part importante des tâches professionnelles dans chaque pays européen. En Roumanie en particulier, près de la moitié des salariés (44 %) sont amenés à manipuler des charges lourdes. Dans ce contexte, les lieux de travail industriels, les services de livraison de meubles, les secours et services d'urgence et les hôpitaux sont des lieux cibles d'intérêt. Il est important de prendre en compte la conception ergonomique, notamment sur les lieux de travail fixes. Si des mesures techniques ou organisationnelles permettent d'améliorer l'ergonomie, l'utilisation d'exosquelettes ne devrait pas être privilégiée (Schick, 2018). Néanmoins, les exosquelettes qui améliorent les performances des travailleurs risquent de susciter plus d'intérêt que la conception des lieux de travail axée sur l'humain (Baltrusch et al., 2018).

**Figure 2 Pourcentage d'employés de tous âges en Europe qui passent un quart de leur temps à porter ou à déplacer des charges lourdes (Eurofound, 2019)**



24%	Portugal	24 %	Portugal
25%	Netherlands	25 %	Pays-Bas
26%	Luxembourg	26 %	Luxembourg
26%	Italy	26 %	Italie

27%	Bulgaria	27 %	Bulgarie
27%	Denmark	27 %	Danemark
28%	Cyprus	28 %	Chypre
28%	Germany	28 %	Allemagne
29%	Belgium	29 %	Belgique
30%	Slovenia	30 %	Slovénie
31%	Austria	31 %	Autriche
32%	Estonia	32 %	Estonie
32%	Ireland	32 %	Irlande
32%	United Kingdom	32 %	Royaume-Uni
32%	Hungary	32 %	Hongrie
32%	Croatia	32 %	Croatie
33%	Czech Republic	33 %	République tchèque
33%	Malta	33 %	Malte
35%	Poland	35 %	Pologne
36%	Lithuania	36 %	Lituanie
36%	Sweden	36 %	Suède
36%	France	36 %	France
37%	Spain	37%	Espagne
37%	Slovakia	37 %	Slovaquie
37%	Finland	37 %	Finlande
38%	Greece	38 %	Grèce
38%	Latvia	38 %	Lettonie
44%	Romania	44 %	Roumanie

Les exosquelettes actifs jouent un rôle peu important dans la pratique, en raison de problèmes techniques: plusieurs rapports mettent en évidence des problèmes concernant leur poids, la structure mécanique, le support de batterie et la conception de la mécanique d'entraînement (Yang et al., 2008; Herr, 2009; De Looze et al., 2016). En revanche, certains exosquelettes passifs sont déjà sur le marché. Mais leur capacité de soutien est restreinte car, au départ, seules certaines parties du corps peuvent être soulagées. L'assistance au levage de charges lourdes est encore limitée.

L'utilisation prévue des exosquelettes dépend dans une large mesure de leur domaine d'application. Outre leur utilisation comme moyens techniques, les exosquelettes pourraient également être utilisés comme dispositifs de protection individuelle ou dispositifs médicaux. En fonction des applications visées, différentes certifications doivent être obtenues, en lien étroit avec les questions de SST.

## Certifications des exosquelettes

Il n'existe toujours pas de réglementation ou de certification uniforme des exosquelettes en raison de leur large éventail d'applications dans les domaines thérapeutique, industriel et militaire et de leurs différents types de conception. Pour combler cette lacune, il faut en premier lieu examiner leur conception fonctionnelle et l'usage auquel ils sont destinés. À cet égard, un exosquelette peut être classé comme un moyen d'aide technique destiné à faciliter la tâche d'un travailleur. Il peut aussi être défini comme un équipement de protection individuelle (EPI). Dans ce cas, l'exosquelette protège le travailleur par rapport à la charge physique de travail pouvant entraîner des maladies professionnelles, telles que des blessures de surutilisation. Il n'existe actuellement aucun consensus sur l'efficacité des exosquelettes dans la prévention des TMS, ce qui ne facilite pas leur classification.

Leur application pratique est étroitement liée à la certification spécifique. Comme susmentionné, un exosquelette peut être défini comme une aide technique conformément aux dispositions de la directive de l'Union européenne relative aux machines (2006/42/CE). Les systèmes actifs peuvent être définis plus précisément avec la réglementation internationale sur les robots et les dispositifs robotiques (ISO 10218-1:2011) et sur les exigences de sécurité pour les robots de soins personnels (ISO 13482:2014).

Si un exosquelette est certifié comme EPI, sur la base de la directive européenne 89/686/CEE, il peut être utilisé à des fins préventives pour éviter des blessures professionnelles ou de surutilisation. Il convient de noter que cette directive est progressivement remplacée par le nouveau règlement (UE) 2016/425 relatif aux équipements de protection individuelle.

Enfin, un exosquelette peut être considéré comme un dispositif médical conformément à la réglementation européenne correspondante (93/42/CEE). Les dispositifs médicaux doivent répondre à des normes élevées de sécurité et de performance. L'évaluation clinique de l'efficacité médicale, encore difficile à prouver, représente un défi. Mais toutes ces exigences doivent être satisfaites pour utiliser les exosquelettes à des fins de rééducation ou dans des applications médicales, ou pour les intégrer sur le lieu de travail (Schick, 2018).

## Évaluation des risques sur un lieu de travail avec exosquelettes

Les employeurs sont, de manière générale, tenus de fournir un environnement de travail sûr et sain et de limiter les risques potentiels pendant le travail. Tous les employeurs en Europe doivent procéder à des évaluations des risques sur le lieu de travail, obligatoires et qui tiennent compte de tous les risques professionnels possibles. Conformément à la directive européenne visant à répondre aux obligations en matière d'évaluation des risques de la directive-cadre (89/391/CEE), des mesures spécifiques sont décrites. Elles incluent la prévention des risques professionnels, l'information et la formation des travailleurs et des organisations, ainsi que les moyens de mettre en œuvre les actions nécessaires à cet effet. Sur la base de ces réglementations, les risques qui peuvent être liés aux exosquelettes sur des lieux de travail spécifiques doivent être pris en considération.

Les exosquelettes sur les lieux de travail présentent de nombreux risques potentiels qui sont liés à leur conception et à leur fonctionnalité. Les dispositifs actifs peuvent comprendre des défauts mécaniques et techniques. Par exemple, un dysfonctionnement peut causer des blessures, le mécanisme d'entraînement des exosquelettes actifs risquant d'exercer des forces supplémentaires sur le corps du travailleur. Il est actuellement difficile de déterminer précisément les différentes forces de ces dispositifs portables et leur lien avec les blessures. Les valeurs seuils biomécaniques des robots coopératifs (ISO/TS 15066:2016) peuvent être considérées à titre de référence générale (Schick, 2018). Il se pourrait que les exosquelettes augmentent le risque de blessures si le travailleur glisse, trébuche ou tombe. Mais leur impact est actuellement évalué comme faible lorsque des exosquelettes des membres supérieurs sont portés en situation de travail impliquant de marcher sur un sol de niveau égal (Kim et al., 2018). En fonction de la conception et du poids de l'exosquelette, la liberté de mouvement naturelle des travailleurs peut se trouver limitée. En cas de déséquilibre, ils risquent d'être gênés dans leurs mouvements et de chuter. Le cas échéant, les conséquences pourraient être plus graves que sans exosquelette. En outre, il faut envisager les risques de collision avec des équipements de travail, des robots ou des engins de construction. À cet égard, des simulations informatiques ont été réalisées pour étudier les applications pratiques des exosquelettes dans des environnements virtuels d'usines (Constantinescu et al., 2016). En conclusion, plusieurs restrictions ont été évoquées en ce qui concerne le réaménagement des lieux de travail intégrant des exosquelettes. En cas d'urgence, les bâtiments doivent être évacués rapidement pour assurer la sécurité et la santé de tous les employés. Le cas échéant, il est essentiel de pouvoir enlever un exosquelette au plus vite. Les concepteurs devraient également envisager les situations où les travailleurs peuvent se retrouver seuls.

En résumé, les risques liés aux exosquelettes pour la santé et la sécurité peuvent être évalués dans des scénarios, mais ne font pas encore l'objet de spécifications. Cela est dû en partie à l'insuffisance des preuves scientifiques (Schick, 2018) et au manque d'expérience pratique. Plus particulièrement, les effets à long terme des exosquelettes sur le système musculosquelettique sont inconnus. Il demeure donc nécessaire de mener des études approfondies tenant compte des aspects physiologiques, médicaux, biomécaniques et physiologiques des exosquelettes.

## Évaluation des exosquelettes

La question des avantages et inconvénients des exosquelettes est controversée dans la littérature. En général, les groupes de recherche voient dans ces dispositifs des perspectives prometteuses pour améliorer les conditions de travail et réduire les TMSLT qui sont souvent associés aux tâches de manutention manuelle (Hensel et al., 2018). Cependant, les sollicitations physiques du système musculosquelettique ne sont pas les seuls aspects à considérer. Les exosquelettes peuvent également

avoir une incidence sur l'environnement social ou sur d'autres paramètres physiologiques, comme la tension artérielle, la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque.

## Aspects physiologiques

Le port d'une structure externe telle qu'un exosquelette par un travailleur peut avoir des effets physiologiques négatifs. Il a déjà été démontré dans la littérature que la masse additionnelle que représente un exosquelette peut être à l'origine d'une augmentation des sollicitations cardiaques (Theurel et al., 2018), bien que les effets soient encore mal connus. Une étude antérieure a révélé l'impact du poids sur la dépense énergétique induite par le mouvement: une hausse de la consommation d'oxygène proportionnelle au poids du dispositif a été observée. Néanmoins, la dépense énergétique varie dans une large mesure en fonction du sexe, de la vitesse de marche et du poids corporel. (Holewijn et al., 1992). De leur côté, Whitfield et al. (2014) ont pu prouver qu'une aide au levage n'augmente pas la consommation d'oxygène lors de tâches répétitives, malgré la masse supplémentaire du dispositif. Ces résultats vont dans le même sens que les conclusions de différents groupes de recherche qui n'ont observé aucun changement de la fréquence cardiaque des sujets portant un dispositif de levage individuel (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Pour conclure à propos des applications industrielles, Whitfield et al. (2014) suggèrent que les dispositifs de levage individuels ne devraient pas servir à accroître l'étendue des tâches. Ces différentes conclusions pourraient s'appuyer sur la diversité des exosquelettes étudiés précédemment. Outre la structure mécanique et la fonction des exosquelettes, la nature des tâches à accomplir (par exemple en conditions dynamiques ou statiques) a également un impact sur les coûts métaboliques et il est donc d'autant plus difficile de faire des observations générales. Cependant, dans des conditions particulières, les exosquelettes peuvent réduire la fatigue musculaire et présentent donc un important potentiel d'amélioration de la santé des travailleurs, en supposant que la fatigue musculaire augmente le risque de blessure (Godwin et al., 2009; Lotz et al., 2009). Une assistance permanente peut également avoir des effets négatifs à long terme sur le système musculosquelettique. Une réduction de la masse musculaire et, par voie de conséquence, de la force corporelle pourrait se produire et être largement liée au niveau d'assistance musculaire assuré par le dispositif.

De plus, il pourrait y avoir des points de compression musculaire sur les parties du corps en contact avec l'exosquelette, risquant à terme d'occasionner un inconfort. Des sangles ou des ceintures pourraient comprimer les vaisseaux sanguins, et être également à l'origine d'inconforts. La fréquence cardiaque et la tension artérielle peuvent aussi être impactées par l'utilisation d'un exosquelette pour des tâches répétitives avec les bras relevés au-dessus de la tête. Enfin, il peut y avoir un risque d'irritation cutanée due à des frottements ou à des réactions allergiques. Ces éléments sont toutefois hypothétiques et ne sauraient être considérés qu'avec prudence.

## Acceptation par l'utilisateur et effets psychosociaux

Bien que les effets physiques des exosquelettes sur les travailleurs risquent d'avoir une influence notable, l'acceptation par l'utilisateur peut également jouer un rôle majeur dans l'environnement de travail. L'acceptabilité d'un exosquelette est essentielle pour une utilisation à long terme. Des recherches tenant compte des évaluations subjectives de ces dispositifs ont été réalisées dans le but d'améliorer l'acceptabilité de la technologie (Gilotta et al., 2018; Hensel et al., 2018). Les exosquelettes rigides sont jugés de manière positive par de nombreux utilisateurs, mais Hensel et al. (2018) montrent que leur acceptation, étroitement liée au confort et à la facilité d'utilisation, risque de diminuer avec le temps. L'inconfort est l'un des aspects déterminants et risque de compromettre un usage plus étendu des exosquelettes dans les lieux de travail industriels (Bosch et al., 2016). Là encore, il convient de mentionner que ces évaluations sont fortement liées à des tâches et des exosquelettes spécifiques et ne permettent donc pas une généralisation. Néanmoins, les résultats indiquent que les développeurs devraient tenir compte de la fonctionnalité et du poids, ainsi que de la conception ergonomique de ces dispositifs. Par ailleurs, les travailleurs peuvent avoir un sentiment d'infériorité lorsqu'ils utilisent un exosquelette pour accomplir leurs tâches quotidiennes, la performance physique étant également associée au dispositif. Gilotta et al. (2018) mentionnent les aspects sociaux comme un facteur susceptible de réduire l'acceptabilité. Les travailleurs qui portent un exosquelette peuvent se sentir stigmatisés sur le lieu de travail, s'il leur semble qu'ils sont dépendants de leur dispositif d'assistance.

## Aspects biomécaniques

Actuellement, de nombreuses études montrent que les exosquelettes peuvent réduire les sollicitations physiques dans certaines parties du corps, comme les articulations de l'épaule ou la partie inférieure de la colonne vertébrale (Abdoli-E et al., 2006; Graham et al., 2009; Bosch et al., 2016; De Looze et al., 2016; Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). Mais dans le même temps, il se peut aussi que les nouvelles répartitions des sollicitations physiques entraînent une augmentation des tensions dans d'autres parties du corps si les forces ne sont pas transférées vers le sol (Theurel et al., 2018; Weston et al., 2018). À cet égard, Weston et al. (2018) constatent qu'un exosquelette des membres supérieurs augmente la charge sur la colonne lombaire. Theurel et al. (2018) montrent pour leur part qu'un exosquelette des membres supérieurs est capable de réduire l'activité musculaire des articulations de l'épaule. Mais des conséquences physiques sont évoquées, notamment des niveaux plus élevés de sollicitation musculaire dans d'autres parties du corps ou des schémas de mouvement altérés. De plus, le poids supplémentaire d'un exosquelette affecte non seulement l'effort cardiovasculaire, mais déplace également le centre de la masse, ce qui influence l'activité musculaire de la personne qui le porte. Il est important de mentionner ici qu'on ne peut pas faire de généralisations concernant les effets des exosquelettes sur le corps humain. Les recherches biomécaniques portent souvent sur des mouvements et des activités musculaires très spécifiques et ne prennent pas en considération tous les cas possibles d'utilisation et les types d'exosquelettes. Néanmoins, elles peuvent aborder le manque de fonctionnalité dû aux effets mécaniques d'exosquelettes spécifiques et leurs conséquences sur les contraintes et les tensions corporelles.

## Défis en matière de sécurité et de santé au travail

La mise en œuvre de nouvelles technologies sur le lieu de travail implique toujours une évaluation critique de la SST à l'intention des parties prenantes. De manière générale, une conception centrée sur l'être humain, conformément à la directive-cadre (89/391/CEE), est une condition préalable fondamentale. Dans une perspective plus restreinte, les lieux de travail standard n'ont pas besoin de mesures supplémentaires. Cependant, en raison de la situation actuelle du travail en Europe et de la relation entre les troubles musculosquelettiques et l'utilisation des nouvelles technologies, les conditions ergonomiques ne sont pas une évidence. Afin d'assurer un bon environnement de travail, des mesures techniques, organisationnelles et individuelles, conformément à la directive-cadre (89/391/CEE), devraient être envisagées. Elles doivent être mises en œuvre de manière hiérarchique en termes d'impact sur la SST. Si toutes les mesures techniques ont été épuisées (par exemple l'utilisation d'aides au levage ou le réaménagement d'un lieu de travail), des mesures organisationnelles telles que la réorganisation des processus de travail doivent être considérées. En dernier lieu, des mesures de protection individuelle peuvent être envisagées.

Comme indiqué précédemment, les exosquelettes peuvent être définis en tant que dispositifs techniques ou médicaux mais aussi comme des équipements de protection. Leur classification dépend largement de leur application, de leur conception et de l'usage auquel ils sont destinés. Ainsi, ils ne peuvent être évalués actuellement que selon une approche au cas par cas. Dans la pratique, des exosquelettes pourraient être utilisés comme des dispositifs techniques destinés à faciliter les processus de travail. Mais ils doivent être considérés comme des EPI si leur utilisation vise à améliorer un lieu de travail où des mesures ergonomiques sont nécessaires pour protéger les travailleurs contre le risque de blessures de surutilisation.

À l'avenir, l'évaluation des exosquelettes devrait être intégrée à l'approche ergonomique traditionnelle (conception centrée sur l'humain), étant donné qu'ils ont un impact sur les situations de travail et les aspects organisationnels.

## Travailleurs

Les exigences des utilisateurs dépendent de la classification spécifique de l'exosquelette en question. S'ils sont certifiés comme dispositifs techniques, les exosquelettes sont liés aux lieux de travail et ne peuvent pas être utilisés dans toutes les situations de travail possibles à moins qu'ils aient été pris en compte pour cette application. Toutefois, les dispositifs techniques ne sont pas des mesures individuelles et leur utilisation est facultative. Si un exosquelette est certifié comme EPI, son utilisation

est légalement obligatoire. Le cas échéant, un employé doit être équipé d'un exosquelette tant qu'il est soumis à une charge de travail accrue.

## Employeurs

Lorsqu'ils mettent en œuvre de tels dispositifs, les employeurs doivent tenir compte de différents aspects. Par rapport aux aides techniques, les EPI sont soumis à des exigences plus strictes en matière d'hygiène. Dès lors qu'un exosquelette est un EPI, son utilisation devient obligatoire. Pour répondre à ces exigences, tout travailleur qui intervient sur un lieu de travail nécessitant un exosquelette en tant qu'EPI doit être équipé d'un tel dispositif, ce qui peut entraîner des problèmes de stockage de matériels. De plus, il convient de tenir compte des adaptations chroniques, des TMS, des réponses cardiovasculaires et des aspects de performances. Il faut également prévoir une quantité suffisante de produits de nettoyage ou de machines à laver pour satisfaire aux normes d'hygiène. S'ils sont définis comme des aides techniques, les exosquelettes sont facultatifs et ne doivent pas nécessairement être mis à la disposition de tous les employés sur le lieu de travail. Mais lorsqu'ils sont utilisés, ils doivent être considérés comme une aide (une assistance) et non comme un moyen d'améliorer les performances ou l'efficacité des travailleurs.

## Responsables politiques

À l'avenir, les responsables politiques devraient envisager de réglementer les aspects techniques et les applications des exosquelettes, afin de faciliter la certification de la nouvelle technologie. Les fabricants pourront ainsi classer leurs produits et les employeurs pourront les utiliser pour l'usage auquel ils sont destinés. Il convient toutefois de noter que l'utilisation prévue du produit et la certification correspondante relèvent toujours de la responsabilité du fabricant.

(...)

## La révolution des exosquelettes aura-t-elle lieu ?

Par Stéphane Desmichelle le 06.12.2017

**Qu'il s'agisse de la médecine ou de l'industrie, les exosquelettes se développent rapidement. Vont-ils envahir notre environnement à court-terme ou ne sont-ils que l'expression d'un fantasme futuriste ? Actuellement, des limites scientifiques persistent.**

*Cet article de Stéphane Desmichelle a obtenu mardi 5 décembre 2017 le prix "presse grand public" décerné par le SNITEM, le Syndicat National de l'Industrie des Technologies Médicales.*

Charles Perrault a-t-il été visionnaire en imaginant, dans *Le Petit Poucet*, des bottes de sept lieues qui s'adaptent à la taille de celui qui les chaussent et lui permettent de parcourir sept lieues en une seule enjambée ? Des dispositifs finalement proches de nos très "high-tech" exosquelettes, prêts à envahir nos quotidiens. En effet, ces extensions "synthétiques" portées par l'homme pourraient, justement, mettre du foin dans les bottes de certains entrepreneurs dans les années à venir. Le cabinet de stratégie américain Grand View Research estime que le marché mondial des exosquelettes atteindra 3,3 milliards de dollars en 2025. Et les domaines d'application sont variés. Pourtant, des problèmes techniques et éthiques persistent.

### Des exosquelettes pour la mobilité

C'est simple comme un coup de pied dans un ballon. Le 12 juin 2014, au Brésil, un adolescent paraplégique a (tant bien que mal) donné le coup d'envoi de la coupe du Monde de football grâce à un exosquelette contrôlé par la pensée. Une opération à 14 millions de dollars, financée par le Walk Again Project (WAP), un consortium international de recherches à but non lucratif. Le principe est basé sur la captation de signaux cérébraux (que des patients s'entraînent préalablement à produire) à l'aide d'un système d'électroencéphalographie, convertis par la suite en instruction de mouvement du robot. Un enjeu de taille pour ces patients chez qui l'espoir de (re)marcher renaît.

L'entreprise américaine Ekso Bionics, ou encore Hyundai, proposent ce type de dispositifs. En 2016, les scientifiques associés au WAP ont publié une étude portant sur huit patients paraplégiques ayant été entraînés pendant un an avec l'exosquelette couplé à une interface homme/machine. Ils ont obtenu des résultats qualifiés de "sans précédents" : grâce à la "plasticité cérébrale", c'est-à-dire la capacité du cerveau à générer de nouvelles connexions après une lésion neuronale, via des mouvements intenses et répétés réalisés avec l'exosquelette, les patients (tous atteints d'une lésion de la moelle épinière) auraient récupéré des fonctions neurologiques en-dessous de la lésion : certains ont partiellement retrouvé des sensations dans les jambes, la capacité de contrôler des contractions musculaires, la possibilité d'esquisser des mouvements, voire même une vie sexuelle. Pour aller encore plus loin, le neurochirurgien Alim-Louis Benabid a opéré le 21 juin 2017 à Grenoble un tétraplégique pour équiper son cerveau d'implants destinés à contrôler un exosquelette.

Il faut toutefois raison garder. En effet, bien que très prometteurs, ces exosquelettes peuvent aussi se révéler décevants pour leurs acquéreurs. Nathanael Jarrassé, chargé de recherche au CNRS à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique, est nuancé : *"Il y a un décalage entre la réalité technologique et l'imaginaire qui est très fantasmé. Les verrous technologiques comme la puissance de calcul, les matériaux composites, ont sauté. Néanmoins, il reste des verrous scientifiques importants sur la compréhension du contrôle du mouvement humain et sur l'interaction homme-machine"*. Autrement dit, le décodage de l'intention motrice de la personne placée dans l'exosquelette reste très expérimental. Et d'appeler à la prudence : *"Lorsque la personne n'a plus le contrôle d'une partie de son corps, l'exosquelette – selon les ordres donnés via l'appui sur un bouton ou joystick, la voix ou la pensée dans certains cas expérimentaux – va la mobiliser pour lui. En revanche, ce partage du contrôle devient beaucoup plus complexe lorsque l'utilisateur possède encore des capacités de mobilisation"*.

## ***"Il faut continuer à avancer en se rappelant qu'il y a toujours un humain au contrôle, c'est très important"***

Et dans le domaine médical, les applications des exosquelettes ne s'arrêtent pas là. Parmi elles, le projet européen Balance, dont l'objectif est de réaliser un exosquelette robotique qui améliore la performance de l'équilibre des humains en position debout et en marche. Une start-up française, Japet, remarquée par le MIT Review en mai 2017, propose quant à elle un exosquelette pour soulager les lombalgies lors de la rééducation, actuellement testé au CHU de Lille.

Le dernier-né d'une collaboration entre l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et des chercheurs italiens, est destiné à prévenir les chutes chez les personnes âgées. Muni de moteurs au niveau des hanches et reliés aux cuisses par des montants articulés, il apprend comment marche une personne et l'empêche ensuite de tomber. Pour l'instant, le dispositif, qui a fait l'objet d'une publication dans *Scientific Reports* du jeudi 11 mai 2017 a été testé en laboratoire sur 8 personnes, âgées en moyenne de 69 ans. Les résultats sont prometteurs mais l'engin assez encombrant. Objectif des chercheurs : rendre l'exosquelette plus "discret" et le tester dans la vie réelle.

Et ce ne sont que des exemples parmi tant d'autres. Mais pour Nathanael Jarrassé, ce n'est pas forcément du côté de la médecine qu'il va falloir regarder en premier. *"Les troubles musculo-squelettiques représentent un budget énorme pour les entreprises. Les premiers exosquelettes qui vont se développer à court terme seront sûrement ceux liés à la santé au travail, à l'ergonomie..."*

## **Vers la fin de la pénibilité au travail ?**

Justement, l'industrie expérimente ainsi toutes sortes d'exosquelettes pour rendre plus faciles certaines tâches physiquement complexes. Selon un rapport publié en avril 2017 par le cabinet de conseil stratégique ABI research, le marché est porteur : il pourrait dépasser les 2,6 millions d'exosquelettes industriels. Là encore, les exemples sont foison. La société RB3B teste depuis 2016 un modèle avec l'entreprise de bâtiment Colas pour l'étalage du bitume. Dans un site pilote à Rouen, Renault a également équipé ses ouvriers d'exosquelettes pour travailler sans se courber ou porter jusqu'à 15 kilos à bout de bras.

L'objectif, supprimer la pénibilité de certains jobs, est louable. Est-ce que cela fonctionne pour autant ? *"Le même exosquelette peut gêner dans des tas d'autres tâches, nuance Nathanael Jarrassé. On perd une capacité pour en gagner une autre. Le risque dans l'industrie serait qu'en assistant, on génère de nouveaux gestes stéréotypés et sur le long terme des troubles physiques : qu'on mette plus en danger le corps qu'on ne le sauve".* Un obstacle donc que les scientifiques tentent de dépasser. Des chercheurs de l'université Carnegie Mellon, dans une étude publiée le 23 juin 2017 dans la revue *Science*, révèlent avoir conçu des exosquelettes capables de s'auto-ajuster (pour l'instant uniquement en laboratoire) grâce à un algorithme selon les besoins de leur porteur. Car ce qui fait la force de l'humain, c'est sa polyvalence.

*"Dès qu'il y a de la variabilité dans une tâche ou dans son environnement, il devient très difficile d'utiliser des robots, commente Nathanael Jarrassé. On ne peut pas tout automatiser, et ce couplage homme-exosquelette (l'humain pour le contrôle et le robot pour la partie physique comme le décuplement de la force) est une solution intermédiaire intéressante".* Mais le chercheur reste prudent : *"Il faut continuer à avancer en se rappelant qu'il y a toujours un humain au contrôle, c'est très important"*. D'ailleurs, ces questions de la relation homme-robot préoccupent beaucoup les chercheurs en robotique, comme le montre le rapport « Ethique de la recherche en robotique » récemment publié par la Cerna (Commission de réflexion sur l'Éthique de la Recherche en sciences et technologies du Numérique d'Allistene). Et l'Association française de normalisation (AFNOR), qui édite les normes NF, a lancé une plateforme d'échanges et d'expérimentations pour que les industriels expérimentent la méthode d'évaluation de l'interaction humain-exosquelettes (accord AFNOR Z 68-800) élaborée par des professionnels. Réunion de lancement prévue le jeudi 29 juin 2017.

## Les exosquelettes entrent timidement dans les usines

Dans les usines les ouvriers ressembleront-ils un jour à Robocop ? Très présentes dans le cinéma, ces armatures commencent à intéresser les industriels souhaitant « augmenter » ou « préserver » leurs opérateurs.

Par **Emmanuel Guimard**, Publié le 6 juin 2018 à 16:03

Iron Man, Robocop, Avatar... Hollywood raffole des exosquelettes. A son tour, l'industrie commence à tester ces solutions destinées à assister, soutenir ou prêter main-forte à l'homme au travail. Rien à voir donc avec les costumes d'Avengers. Concrètement, un exosquelette industriel peut accompagner l'opérateur en posture assise, debout, accroupie, penchée sur une table de drapage, les bras en l'air, l'aider à porter des sacs de ciment, des pièces mécaniques, un outil... Ils sont encore le plus souvent « *passifs* », c'est-à-dire sans moteurs ni batteries et fonctionnant par retour d'effort de ressorts et d'élastiques. Selon Claude Gimenez, qui suit ce dossier chez Airbus, ces modèles « *passifs* » couvrent 60 % des besoins. Les modèles « *actifs* », ou motorisés sont encore en phase expérimentale.

### Points de vigilance

« *Nous visons des équipements qui se mettent en une minute et qui s'enlèvent en moins de 30 secondes* », mentionne Benoît Sagot-Duvauroux, responsable de la marque Gobio. « *La règle est de ne pas excéder 10 % du poids de celui qui le porte.* » Selon cet expert, la notion d'acceptabilité est également essentielle. L'homme « *augmenté* » ou « *préservé* » doit se sentir valorisé et non pas la risée de ses collègues.

Anticipant l'émergence potentielle du marché, l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) a rédigé plusieurs publications sur les bonnes questions à se poser et les points de vigilance liés aux exosquelettes. « *Cela exige une démarche structurée, une définition des besoins et de l'adéquation entre l'appareil, l'opérateur et la spécificité de sa tâche* », note Laurent Kerangueven, ergonome à l'INRS.

### Customisation

Le CEA List, à Saclay s'y est intéressé très tôt à des fins militaires, médicales mais aussi industrielles. Le laboratoire travaille en particulier, avec un abattoir des Pays de la Loire et la société RB3D, sur un exosquelette renforçant les membres supérieurs de l'opérateur chargé de découper des pièces de bovins, là où un cobot suffit pour les carcasses de porc. « *Le marché se développe au fur et à mesure des cas d'usage, la partie customisation est donc encore assez poussée* », mentionne Philippe Watteau, directeur des partenariats industriel au CEA Tech qui prédit l'arrivée de modèles de plus en plus génériques, aptes à une plus grande diversité de tâches en faisant appel aux technologies de l'intelligence artificielle.

### Prix à la baisse

Les pistes explorées par le CEA List tendent donc vers une meilleure compréhension, par les exosquelettes, de leur environnement avec des algorithmes de détection d'intention, d'apprentissage de gestes pour des mouvements plus fluides. « *Le but est que la personne sente de moins en moins qu'elle est habillée de cet exosquelette* », poursuit Philippe Watteau qui croit fermement à un développement du marché.

Selon l'expert, les prix ont été divisés par trois en cinq ans. Les maladies de types TMS et la souffrance au travail en général sont de moins en moins acceptées. Le cabinet de conseil stratégique ABI Research estime à plus de 100.000 appareils le marché annuel à l'horizon 2025. On en est encore loin mais, déjà, le sujet mobilise de nombreux acteurs tels les français Gobio, RB3D, BMR, Ortaer, Comau ou, à l'étranger, Ekso, Levitate, Skelex ou Labeo. Les grands groupes industriels testent, explorent ou tentent d'adapter à leurs besoins ces solutions. L'heure n'est pas encore au déploiement de masse.

### Exosquelette ou cobot ?

Certains se montrent sceptiques sur un tel essor. C'est le cas Alexis Girin, responsable de l'équipe cobotique à l'Institut de recherche technologique (IRT) Jules Verne. « *Le concept général de l'usine du futur est de recentrer l'homme sur des tâches à forte valeur ajoutée faisant appel à son intelligence et à son adaptabilité et non pas à sa force et à son endurance* », soutient cet expert. Selon lui, il est donc absurde d'équiper huit heures par jour un opérateur d'un exosquelette intégral coûteux pour une tâche qui ne représente que 15 à 20 % de son temps de travail. « *Mieux vaut dans ce cas utiliser un cobot avec équilibreur de charge* », dit-il, s'amusant de voir Sigourney Weaver, dans « *Alien 2* », équipée d'un exosquelette hypersophistiqué pour « *porter des caisses* ».

# Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention (*extraits*)

Jean-Jacques Atain Kouadio et Adel Sghaier

INRS - octobre 2017

(...)

## 1. Introduction

Les développements technologiques récents, tant dans le domaine des capteurs que des nouvelles technologies et de l'électronique ont permis l'essor de la robotique collaborative et notamment des robots d'assistance physique (RAP). Ce type de robot était annoncé comme permettant d'allier la force, la robustesse et la répétabilité<sup>1</sup> d'un robot avec l'intelligence et les capacités d'analyse et de prise de décision d'un opérateur humain. Plus récemment, pour faire face aux limites d'encombrement et d'autonomie de systèmes robotisés ou pour des raisons économiques, on constate également l'émergence de technologies d'assistance physique pour lesquels l'assistance physique est générée par un principe de restitution d'énergie mécanique (par exemple, ressorts, élastiques), il s'agit alors de dispositifs d'assistance physique (DAP).

Le but annoncé de l'utilisation de ces nouvelles technologies d'assistance physique (RAP et DAP) est double. En premier lieu, améliorer les conditions de travail des opérateurs en réduisant leur charge physique de travail et des facteurs de risques biomécaniques de troubles musculo-squelettiques (TMS). En deuxième lieu, augmenter et améliorer les performances de l'opérateur et de ce fait améliorer la productivité et la compétitivité des entreprises.

L'utilisation des robots et dispositifs d'assistance physique au travail introduit cependant de nouvelles questions relatives à la santé et la sécurité. D'une part, la proximité liée à la collaboration entre le robot et l'opérateur expose ce dernier aux phénomènes dangereux classiques inhérents aux machines (mécaniques, électriques, thermiques, bruit, vibrations, etc.) qui peuvent être sources de maladies ou d'accidents du travail. D'autre part pour les RAP et les DAP, les changements apportés dans les façons de travailler que ce soit du point de vue des stratégies gestuelles ou du point de vue de l'organisation du travail peuvent être source de stress professionnel, de surcharge informationnelle, de troubles cognitifs et/ou proprioceptifs, de postures contraignantes, de contraintes physiologiques nouvelles.

Ce document a comme objectif de présenter les principaux points de vigilance liés à l'utilisation de ces robots et dispositifs d'assistance physique, dont les retours d'expérience ont pu être réalisés entre 2013 et 2016. Dans la première partie, sont rappelés la typologie, le contexte normatif attaché aux robots d'assistance physique, leurs principes de fonctionnement ainsi qu'une brève présentation du fonctionnement d'un dispositif d'assistance physique<sup>2</sup>. Dans la deuxième partie, des expériences et retours de terrain sont détaillés. La dernière partie qui revient sur les aspects de santé et de sécurité au travail, soulève un certain nombre de questions et formule des conseils pour la mise en œuvre de robots et de dispositifs d'assistance physique sur le terrain. Ce travail s'inscrit dans la continuité de l'action de veille et prospective sur les RAP menée par l'INRS en 2013. Celle-ci a permis d'anticiper l'évolution de la technologie des RAP à l'horizon 2030 et d'identifier les enjeux de santé et de sécurité au travail d'une telle évolution<sup>3</sup>.

(...)

---

<sup>1</sup> La répétabilité d'un robot reflète généralement la précision et la stabilité du mouvement du robot dans le temps. Il s'agit de l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail (en général répétabilité < 0.1 mm).

<sup>2</sup> A la différence des RAP, il n'existe pas à ce jour de norme qui donne les exigences de sécurité spécifiques pour les DAP.

<sup>3</sup> RAP 2030 - Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030, Collection : Prospectives en santé et sécurité au travail, VEP 1, novembre 2015, 259 p - <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=VEP%201>

### 3. Descriptions et principes des robots d'assistance physique

La différence majeure entre un RAP et un robot industriel classique est que le RAP suit le mouvement de l'opérateur en temps réel. Les mouvements d'un RAP sont donc prévisibles par l'opérateur (si on exclut les défaillances). Cette caractéristique, qui nécessite la mise en place de méthodes de commande particulières, est une spécificité technique commune aux RAPsc et RAPac.

(...)

#### 3.2. Les RAPac (ou exosquelette)

Le RAPac est revêtu par l'utilisateur et l'accompagne pour se mouvoir et réaliser son activité professionnelle. Le mouvement des différents axes du RAPac est initié par détection d'une intention du mouvement (mesure du courant, EMG, mesure de la force) de façon à accompagner le mouvement de l'utilisateur. Il existe trois types de RAPac : pour la partie basse du corps (Figure 6), pour la partie haute du corps (Figure 7) et pour l'ensemble du corps (Figure 8). Ces RAPac sont conçus sur la base d'une logique anthropomorphe ; c'est à dire qui se rapproche de la forme du corps humain en suivant les segments corporels qu'ils assistent.



Figure 6. Exosquelette « Hercule » (Crédits RB3D)



Figure 7. Assistance physique membre supérieur (© Deledda)



Figure 8. Assistance physique corps entier (© Deledda)

<sup>1</sup> <http://www.mrk-systeme.de/produkt/features-safeguarding>

On recense deux approches pour la commande des RAPac afin d'accompagner les mouvements de l'opérateur en temps réel :

La commande par capture d'effort : cette méthode consiste à détecter et mesurer l'effort exercé par l'utilisateur par des capteurs d'efforts ou via la mesure des courants issus des moteurs<sup>1</sup>. Cette mesure est ensuite traitée pour déterminer l'intention de l'utilisateur et commander les mouvements du RAPac en conséquence. Un exemple de ce type de robot est illustré par l'exosquelette « Hercule » développé par la société RB3D en collaboration avec la DGA (Figure 6)

La commande par mesure EMG : dans ce cas, les intentions de mouvement de l'utilisateur sont détectées à travers des sondes pyroélectriques (EMG) qui mesurent le signal électrique envoyé par le cerveau aux muscles. Cette technique est essentiellement utilisée pour les RAPac de réhabilitation. Un des exemples de ce type de robot est HAL développé par l'université Tsukuba au Japon. Cette méthode de commande de mouvement peut être aussi utilisée pour les robots d'assistance physique.

Les RAPac sont destinés à deux types d'utilisation :

Le support de charge : Les premières utilisations de ce type de robots sont militaires. Elles permettent d'aider les soldats à porter leurs sacs à dos (comme dans le cas de l'exosquelette « Hercule » figure 7). Dans ce cas, il est nécessaire d'avoir un RAPac sur la partie basse du corps. Ils peuvent également équiper la partie haute du corps lorsque la charge est portée par les membres supérieurs. L'effort est alors transmis mécaniquement au sol à travers la partie basse du RAPac. Cette utilisation pourrait ouvrir des horizons pour l'utilisation des RAPac dans des domaines civils comme le BTP (Bâtiment et Travaux Publics) par exemple.

L'assistance en effort : il s'agit d'amplifier l'effort développé par l'utilisateur à travers les actionneurs du RAPac. Ces actionneurs accompagnent les mouvements de l'opérateur et amplifient ses efforts pour les activités à forte charge physique. Il convient de remarquer que la multiplication d'effort ne fonctionne que lorsque l'opérateur en a besoin.

Les composantes de multiplication d'effort et de support de charge peuvent être combinées comme dans le cas de l'exosquelette « Sarcos » développé pour l'armée américaine.

### **3.3. Les dispositifs d'assistance physique**

Un dispositif d'assistance physique non énergisé est, du point de vue de l'architecture, proche d'un RAPac. Les DAPac sont fixés à l'opérateur, de part et d'autre de l'articulation assistée, par un système de contention. Comme son nom l'indique, la différence fondamentale avec le RAPac est qu'il n'est pas robotisé et qu'il se base uniquement sur des éléments de restitution d'énergie mécanique pour apporter l'assistance physique. Ces éléments mécaniques peuvent se présenter sous la forme de ressorts, d'élastiques, ou d'amortisseurs pneumatiques par exemple.

(...)

---

<sup>1</sup> La mesure des courants issus des moteurs du robot peut être utilisée pour déterminer les efforts qui agissent au niveau de la partie terminale du robot. Il est à noter que cette méthode est moins précise que l'utilisation de capteurs d'effort et ne permet pas de détecter des efforts de faibles valeurs.

## 6. Retours d'expérience du terrain

(...)

### 6.3. Synthèse des constats recueillis sur le terrain

Les interventions en entreprises ont permis de dégager des constats communs sur les motivations des entreprises à acquérir un RAP et les problèmes récurrents identifiés sur le terrain à la suite de l'implantation de RAP.

Parmi les motivations énoncées par les entreprises pour l'implantation de RAP, nous avons identifié les plus répandues qui concernent la réduction des risques liés à l'activité physique :

- Réduire les vibrations
- Réduire les efforts
- Réduire le port de charge

Elles concernent également les préoccupations relatives au maintien au travail et à son accessibilité facilitée pour tous :

- Maintenir la performance de l'opérateur sur l'ensemble de sa carrière
- Faciliter la réinsertion professionnelle des opérateurs souffrant de TMS, au retour d'un arrêt maladie
- Maintenir en activité les opérateurs experts atteints de TMS
- Avoir la possibilité de féminiser le poste de travail
- Faciliter l'embauche de « jeunes » sur des postes réputés très pénibles.

Les problèmes récurrents identifiés sur le terrain sont principalement envisagés du point de vue du travail (sa nature, son contenu, son organisation, etc.) et des interactions Homme-RAP, et du point de vue des acteurs impliqués dans l'implantation.

S'agissant du travail, les exemples suivants illustrent les difficultés rencontrées, d'ordre physique, physiologique, organisationnel et cognitif :

- Au plan physique, L'emprise au sol du RAP induit un encombrement qui influe sur les espaces d'évolution de l'opérateur.
- Sur le plan physiologique, les dispositifs de commande des RAP (par exemple les poignées) peuvent contribuer à l'augmentation des sollicitations du système main-bras. Des difficultés à doser les efforts pour réaliser la tâche peuvent apparaître en raison du facteur multiplicateur du cobot. La nécessité de maintenir un effort pour rester en position de « repos » ou lors des phases d'attente (par exemple lors de l'utilisation du système Exhaus) a un effet sur les séquences de contraction-relâchement des groupes musculaires qui peut être préjudiciable pour la santé des opérateurs.. .
- Sur le plan cognitif, les modifications de la tâche induites par l'implantation d'un RAP font évoluer les stratégies de prise d'information visuelle pour contrôler la qualité du travail et sont susceptibles d'accroître la charge perceptive en intensité et durée.
- Du point de vue organisationnel, certaines composantes telles que le temps nécessaire à l'appropriation des nouveaux dispositifs, la répartition des tâches au sein de l'équipe de travail, l'impact de l'utilisation des nouveaux dispositifs non seulement sur le travail réel de l'utilisateur mais aussi sur celui de ses collègues (redistribution de tâches, gestion des aléas, évolution des régulations collectives, etc) sont rarement anticipés.

Ainsi, une méthodologie d'implantation de ces dispositifs qui privilégie les dimensions « posture et positionnement » des opérateurs, sans prendre en compte les exigences attentionnelles ou les dimensions organisationnelles et psychosociales du travail, risque de ne pas être efficace. De même, la non prise en compte des questions relatives à la variabilité des stratégies gestuelles (prise de l'outil, orientation de l'outil, déplacements, équilibre du corps entier...) et aux marges de manœuvres disponibles pour les opérateurs risque de compromettre l'implantation dans des conditions optimales pour la santé et la sécurité des opérateurs.

Du point de vue des acteurs, les observations montrent que tous les acteurs concernés ne sont pas forcément mobilisés d'emblée. Or, l'implantation de ces dispositifs en entreprise nécessite vraisemblablement l'association de compétences multiples (techniques, organisationnelles et humaines), et requiert en particulier la participation des opérateurs à toutes les étapes du projet. Les modalités de circulation des informations (retours d'expérience, remontées de problèmes à régler) dans la phase d'implantation doivent être définies de façon à éviter toute déperdition/interprétation erronée au risque sinon d'apporter des réponses inappropriées aux problèmes constatés.

(...)

## 7. Enjeux pour la santé et la sécurité au travail

(...)

### 7.2. Questions et point de vigilance RAPac et dispositifs d'assistance physique non énergisés

En ce qui concerne les RAPac, seules les observations de démonstrations commerciales sur le terrain ont pu être exploitées. Ce type de robots représente un projet d'investissement important pour les entreprises et ils existent encore un certains nombres de freins technologiques qui limitent fortement leurs utilisations. L'un des freins technologiques majeur identifié est l'autonomie limitée des batteries. Néanmoins, les retours d'information des industriels et du réseau prévention semblent indiquer qu'il existe un réel besoin en ce qui concerne les RAPac. Cette demande pourra être satisfaite dans le futur à condition que soient levés les principaux freins technologiques.

Parallèlement, l'utilisation des dispositifs d'assistance physique non énergisés voit un développement exponentiel du fait d'un coût d'achat accessible pour des entreprises de toutes tailles. Des observations de terrain ont pu avoir lieu pour l'utilisation de plusieurs modèles de dispositifs d'assistance physique non énergisés en situation réelle de travail.

#### 7.2.1. Risques d'accident du travail

Seuls les RAPac énergisés présentent des risques spécifiques aux machines (risques mécaniques, électriques, thermiques...). Les dispositifs d'assistance physique non énergisés, bien qu'ils puissent également engendrer des risques mécaniques, ne sont pas considérés comme des machines. Les recommandations proposées pour l'analyse des risques spécifiques à chaque cas d'utilisation préconisé pour les RAPsc sont également valides pour les RAPac.

Le risque mécanique (collision, coincement, cisaillement...) est présent lors de l'utilisation des RAPac (exosquelette) et RAPsc (cobot) au travail. Néanmoins la puissance des actionneurs des RAPsc qui est généralement supérieure à celle des RAPac peut générer des dommages plus importants en cas d'accident. En ce qui concerne les RAPac, les risques de chute et de perte d'équilibre sont particulièrement présents du fait que l'opérateur est attaché au robot.

Parmi les risques identifiés lors des observations sur le terrain, on peut citer :

- le risque de dépassement des limites articulaires des membres de l'opérateur, puisque le RAPac est attaché au corps de l'opérateur,
- de possibles risques thermiques liés au contact direct entre la structure du RAPac et le corps de l'opérateur,
- un risque de collision avec les opérateurs qui travaillent à proximité d'un opérateur équipé d'un exosquelette peut également être envisagé.

#### **Recommandations :**

Tout comme les RAPsc, la mise en œuvre d'un RAPac doit être précédé d'une analyse des risques spécifiques.

Il est primordial de respecter les limites de mobilisation de l'ensemble de segments corporels impliqués dans les mouvements avec un exosquelette, en mettant en place une limitation d'axe fiable (de préférence mécanique)

Si les actionneurs (moteurs) de l'exosquelette sont susceptibles de dégager une chaleur importante, il est nécessaire de prévoir une isolation entre l'exosquelette et le corps de l'opérateur.

### **7.2.2. Risques en lien avec la charge physique de travail**

Les risques identifiés lors de l'utilisation d'un exosquelette et d'un dispositif d'assistance physique non énergisé sont assez semblables. En effet, ces deux équipements ont les mêmes architectures et remplissent le même rôle d'assistance physique.

Les risques liés à l'utilisation de ces équipements seraient pour partie liés à une possible standardisation du geste, à une éventuelle fonte musculaire<sup>1</sup> ou à l'inverse, une sur-sollicitation locale (force, amplitudes articulaires, répétitivité, travail statique) et un déplacement des contraintes sur d'autres zones du corps (du membre supérieur vers le dos, des membres inférieurs vers le dos, des doigts vers l'avant-bras...). Il faut aussi noter les retentissements possibles liés aux efforts statiques qu'il est difficile de décrire à ce stade. Des risques liés à la perturbation du mouvement sont également à prendre en compte : modification de la répartition des masses et de l'inertie de l'opérateur, risques de trouble de l'équilibre donc de chute dans le cas de d'exosquelettes et risques de perturbations de la proprioception en temps réel ou après l'utilisation d'un exosquelette. Les zones de pression localisées liées au port d'un RAP doivent également être analysées.

### **7.2.3. Risques psychologiques en lien avec l'interaction homme robot**

En ce qui concerne des retentissements possibles en lien avec l'intensification du travail, on peut citer la complexité induite par l'utilisation des RAP qui peut augmenter la charge mentale et entraîner une plus grande exigence attentionnelle. Ces phénomènes peuvent être encore accrus en cas de dysfonctionnements ou de nécessité de gérer des aléas de production.

L'interdépendance homme-robot peut également constituer un facteur de risques psychosociaux, surtout si l'organisation du travail conduit à mettre, d'une façon ou d'une autre, l'homme sous la dépendance ou en concurrence avec lui et induire ainsi un sentiment de perte de contrôle sur son travail.

## **8. Perspectives**

Compte-tenu du faible nombre d'études menées sur les RAP et les DAP ainsi que du manque de repères scientifiques concernant leur apport en termes d'assistance au travail, l'évaluation de leur mise en œuvre doit s'appuyer sur l'acquisition de nouvelles connaissances. Les expériences de terrain réalisées entre 2013 et 2016 présentées dans ce document soulèvent des questions non encore résolues. Elles permettent néanmoins d'énoncer des points de vigilance relatifs à la conception, l'installation et l'utilisation de ces équipements en faveur de la santé et la sécurité au travail. Ces éléments sont repris dans le dossier web de l'INRS intitulé : Nouvelles technologies d'assistance physique (robots et exosquelettes). Par ailleurs, un programme d'études et recherches a démarré à l'INRS de façon à objectiver les intérêts et limites de ces nouvelles technologies d'assistance physique. Il alimentera au fur et à mesure des résultats obtenus, les connaissances dans ce domaine, à des fins d'évaluation, de normalisation et de prévention.

(...)

---

<sup>1</sup> Cette hypothèse d'un éventuel risque de fonte musculaire fait référence aux effets que peut avoir, par exemple l'immobilisation d'un membre par plâtre ou un autre type d'orthèse, ou d'un séjour en microgravité spatiale.

## La prévention des risques professionnels des exosquelettes



Les exosquelettes de travail sont des structures articulées externes d'assistance à l'effort, portées par l'opérateur, mécaniques, électromécaniques ou mécatroniques, destinées à renforcer les capacités physiques des travailleurs et leur productivité, tout en cherchant à lutter contre les troubles musculo-squelettiques (TMS)...

Les exosquelettes de travail sont des structures articulées externes d'assistance à l'effort, portées par l'opérateur, mécaniques, électromécaniques ou mécatroniques, destinées à renforcer les capacités physiques des travailleurs et leur productivité, tout en cherchant à lutter contre les troubles musculo-squelettiques (TMS) : notamment pour soulager le port manuel de charge, les postures contraignantes et les gestes répétitifs.

Ces nouvelles solutions exo-squelettiques au travail, motorisées (combinaison robotique) ou non, vont se propager rapidement dans de nombreux secteurs, ceux de la logistique ou de la préparation de commandes, des chantiers du BTP, des usines manufacturières (automobile, ...), de l'agriculture et des soins infirmiers etc.

Dans ce contexte de mutation du monde du travail et du développement de ces technologies, il est nécessaire de prendre en compte leurs impacts nouveaux sur la santé et la sécurité en entreprise : le port de l'exosquelette génère en effet de nouvelles contraintes liées à la proximité entre l'homme et le dispositif et à l'acceptation de la dépendance ... L'exosquelette induit ainsi des risques tels que des risques mécaniques dus à une défaillance technique, des risques physiques dus à un usage excessif ou inadapté avec de modifications gestuelles importantes, des risques psychologiques dus aux sentiments de perte d'autonomie, de charge mentale supérieure, des risques organisationnels d'exigence de rendement exagérée en cas d'accélération des cadences.

Le recours aux exosquelettes doit s'intégrer dans une véritable démarche de prévention préalable, puis avec réévaluation de ses effets dans le temps.

### Les principaux risques des exosquelettes au travail

L'exosquelette est un système mécanique ou textile à contention revêtu par l'opérateur et visant à lui apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts et/ou une augmentation de ses capacités motrices (augmentation de la force, assistance des mouvements, etc.). Il peut être robotisé ou non. L'exosquelette est fixé sur tout ou partie du corps (membres supérieurs, dos, membres inférieurs) : dispositifs d'assistance physique à restitution d'énergie assortis de systèmes de type ressort, équipements articulés et motorisés sous la forme de harnais, bras articulés, jambières, armatures intégrales...

La variabilité de nombreuses tâches ou de l'environnement de travail limite l'usage des robots et la possibilité d'une automatisation intégrale, et l'exosquelette est une solution intermédiaire qui permet de combiner la force, l'endurance et la précision de la machine à la dextérité et au contrôle humains : les exosquelettes fournissent une assistance mécanique au travailleur pour faciliter l'exécution de sa tâche et pour réduire les sollicitations physiques (entre 10 et 40% selon les types de modèles).

Un exosquelette est utilisé, soit ponctuellement, soit presque continument. Sur les chantiers du BTP, les opérateurs l'utilisent pour réaliser des tâches difficiles, mais dans les ateliers et magasins, les opérateurs sont souvent amenés à le porter beaucoup plus longtemps

Les objectifs de l'utilisation des exosquelettes sont doubles :

- **amélioration des conditions de travail** : réduction de la pénibilité en limitant la charge physique et les postures contraignantes, diminution des troubles musculo-squelettiques (TMS) et des accidents et arrêts de travail, prise en compte du vieillissement au travail ou d'un handicap et favoriser le maintien dans l'emploi.
- **augmentation de la productivité** : rapidité et qualité d'exécution des tâches, utilisation des outils sur des périodes plus longues, diminution des temps de cycle par l'usage d'outils plus puissants.

Les exosquelettes représentent à la fois une grande opportunité d'améliorer la compétitivité et un effet bénéfique global sur la santé du travail, mais également des risques pour la sécurité des travailleurs qui interagissent avec ces machines.

#### → Les risques mécaniques des exosquelettes

Le dysfonctionnement du système lui-même peut avoir différentes origines : mauvais réglage, défaillances ou pannes ou modifications hasardeuses des moyens de protection, défaillances du système électronique de commande, du logiciel. Cela entraîne une mauvaise coordination des mouvements pouvant sérieusement blesser l'utilisateur ou son entourage. Le risque peut avoir aussi une origine conceptuelle comme la mauvaise réaction à une situation anormale. Les blessures par force d'impact et force de coincement/d'écrasement sont possibles, causées par les nouvelles capacités physiques décuplées mal maîtrisées par l'opérateur : par exemple, les outils eux-aussi doivent suivre la nouvelle cadence pour résister à la nouvelle puissance de l'opérateur et la casse des outils de travail et les projections et bris qui en résultent, peuvent être dangereuses.

La collision de l'exosquelette avec un autre opérateur hors du champ de vision lors du mouvement, avec son bras ou une pièce en cours de manipulation ou un outil solidaire du bras, peut engendrer de sérieuses blessures accentuées par l'énergie cinétique élevée et/ou par le caractère contondant ou tranchant de l'outil.

Il en est de même si l'utilisateur ne peut pas contrôler précisément son propre mouvement qui vient le heurter brutalement et brusquement, avec le choc douloureux du coup de bras appareillé par exemple.

#### → Les risques physiques des exosquelettes

Le port d'un exosquelette a des effets sur la motricité générant des perturbations sensorielles.

Un exosquelette entraîne des changements dans les façons de travailler, du point de vue des gestuelles et de la dynamique de l'utilisateur, qui peuvent être source de troubles proprioceptifs, de perte d'équilibre ou de chute car les repères sont modifiés, les efforts physiques sont différents, avec le report de certaines contraintes sur d'autres parties du corps qu'habituellement (par exemple sur les hanches) : d'où la possibilité d'un déplacement des TMS avec des points de compression différents !

Si l'utilisateur de l'exosquelette est amené à effectuer des mouvements fréquents et prolongés qui surpassent ses capacités de souplesse musculaire, des lésions articulaires peuvent survenir, dues au dépassement des limites physiologiques humaines hors assistance forcée.

Le travailleur étant en contact direct avec l'exosquelette, des risques d'allergies dus aux contacts de l'exosquelette avec la peau, de frottement ou d'abrasion peuvent engendrer des irritations ou plaies cutanées.

Une utilisation très prolongée et/ou trop fréquente d'un exosquelette peut provoquer une désadaptation musculaire lors d'une assistance physique systématique sur de longues périodes.

Plus généralement, dans cette association homme-robot, les conditions de travail peuvent être finalement éprouvantes et inconfortables du fait des hautes performances exigées en cadence et régularité du travail si les interfaces homme-machine et machine-homme manquent d'ergonomie robotique : l'augmentation de la productivité de l'entreprise grâce aux exosquelettes se ferait alors au détriment de la santé des salariés et non pour l'amélioration des conditions de travail !

#### → Les risques psychologiques des exosquelettes

Plus difficiles à appréhender, les risques psychologiques avec l'usage récent des exosquelettes sont encore peu connus par manque de recul et d'études, et il existe des lacunes entre la large et croissante diffusion des applications de la cobotique (robot collaboratif) et la connaissance de leur impact sur la santé psychique et l'augmentation du stress au travail :

- les réponses organisationnelles à toutes les exigences de productivité entraînées par la cobotisation qui s'étendent au personnel amené à travailler avec les exosquelettes, se caractérisent par une grande augmentation des pressions de toute nature sur les délais, la quantité, la qualité de la production.

- L'intensification de la charge mentale due à ces nouvelles technologies est facteur de risque psychologique.
- L'isolement au sein d'équipes clairsemées dans de vastes usines, la réduction d'autonomie, la perte d'identité d'homme-robot sont des conséquences possibles de la cobotisation : interaction constante entre le travailleur et l'exosquelette, peu de communication avec son entourage, perte d'initiative ou marge de manœuvre dans les opérations, les cadences et la précision, dépendance à la machine ressentie comme excessive sans possibilité d'évitement du fait de l'harnachement, survenue d'un sentiment de déshumanisation.
- Anxiété liée à l'appréhension des contacts répétés avec l'exosquelette.
- Ressenti physique de surpuissance de l'homme-robot entraînant des imprudences.
- Diminution de l'expertise avec perte de la technicité et la maîtrise du geste.

## Les mesures préventives des risques des exosquelettes

Les dispositifs techniques et les conditions de sécurité nécessaires à l'utilisation des exosquelettes sont un des éléments fondamentaux au développement de l'automatisation des industries manufacturières dans les pays développés, atout pour stopper ou freiner les délocalisations, voire susciter des relocalisations : cet impératif de sécurité, déjà prégnant dans le cas des robots « classiques », l'est d'autant plus dans le cas du travail collaboratif sans barrière, ni sécurité matérielle entre l'homme et robot ; la robotique collaborative constitue à la fois une évolution émergente majeure de la robotique industrielle et une extension des champs d'application de la robotique à l'assistance au geste dans de nombreuses activités professionnelles. La robotique collaborative est une opportunité de retrouver une compétitivité industrielle et il est donc essentiel que tous les aspects sécuritaires soient correctement pris en compte dès la conception, lors de l'intégration et de l'utilisation des exosquelettes, ainsi que la problématique de la place de l'homme dans les solutions cobotisées.

L'accord AFNOR AC Z 68-800 « Dispositifs d'assistance physique à contention de type exosquelettes robotisés ou non – Outils et repères méthodologiques pour l'évaluation de l'interaction humain-dispositif » sert de référence pour la conception d'un exosquelette afin d'« analyser l'impact du dispositif sur l'activité physique de l'opérateur (méthodes objectives), le ressenti et l'expérience de l'opérateur (méthodes subjectives) et également anticiper les effets biomécaniques de ces exosquelettes sur les opérateurs ».

L'analyse préalable du besoin d'assistance physique en fonction des postes de travail est fondamentale, tout comme l'implication des salariés concernés par le projet : la mise en place des exosquelettes doit provoquer aussi une réflexion sur l'organisation du travail.

La mise en œuvre, au sein d'une entreprise, de ces nouveaux systèmes exo-squelettiques doit préalablement faire l'objet d'un avis du Comité d'Hygiène, de Sécurité et des Conditions de Travail (CHSCT) pour s'assurer de l'acceptabilité des systèmes d'assistance physique par le personnel.

Il y a intérêt d'accompagner le changement lié à un projet de développement d'un exosquelette par une démarche globale et participative au niveau de l'entreprise : c'est ainsi que l'entreprise pourra conjurer les menaces de cette innovation et profiter des opportunités que recèlent toujours une situation évolutive ou une période de transition et d'incertitude, en facilitant l'acceptation des changements et en réduisant les facteurs de rejet, notamment chez les travailleurs les plus âgés.

La phase de formation et de familiarisation des utilisateurs avec l'exosquelette est primordiale et il ne faut pas négliger le temps nécessaire à son acceptation sociale.

Compte-tenu des réticences à l'idée de se transformer en « homme-robot », il faudrait dans un premier temps limiter la durée du port de l'exosquelette et cibler les tâches à réaliser sur des postes pénibles pour lesquels il n'a pas été trouvé de solutions simples pour réduire les risques de TMS et pour lesquels le bénéfice de l'exosquelette paraît évident. Les jeunes travailleurs, plus réceptifs à ces nouveautés technologiques du fait des jeux vidéo, séries télévisées et films de science-fiction qu'ils affectionnent, peuvent s'impliquer plus facilement dans l'adoption des exosquelettes au travail, avec néanmoins une nécessité de toujours prévoir une période d'apprentissage et d'adaptation avec l'outil.

## DOSSIER : LES EXOSQUELETES

(extraits)

(...)

# Une technologie qui soulage d'un poids

Les exosquelettes suscitent nombre d'espoirs en termes d'amélioration des conditions de travail, notamment de réduction des troubles musculosquelettiques (TMS). Toutefois, ils ne peuvent être considérés comme la solution miracle. Leur usage soulève des questions de santé et de sécurité. De la définition du besoin d'assistance physique à l'intégration en situation réelle, une démarche structurée et collective est indispensable.

« ON ASSISTE À UN RENOUVEAU de la demande de technologies d'assistance physique dans l'industrie », constate Nathanaël Jarrassé, chargé de recherches au CNRS à l'Institut des systèmes intelligents et de robotique. Au cours des dernières années, les entreprises ont robotisé bien des situations pour lesquelles l'environnement de travail était paramétrable. Mais l'automatisation atteint ses limites. « Il subsiste, en particulier dans les PME, des situations insuffisamment standardisées ou des petites productions pour lesquelles l'humain reste, heureusement d'ailleurs, indispensable », reprend le chercheur. Pour certaines d'entre elles, les opérateurs sont exposés à des charges physiques importantes, ainsi qu'à des risques de troubles musculosquelettiques (TMS).

Dans ce contexte, et celui d'une mutation globale du monde du travail, les entreprises s'intéressent de plus en plus aux exosquelettes, espérant combiner réduction des TMS et gain de productivité. « Un exosquelette est un dispositif mécanique ou textile revêtu par le salarié apportant une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par compensation des efforts, augmentation de la force ou des capacités de mouvement », énonce Jean-Jacques Atain-Kouadio, expert d'assistance à l'INRS. Il peut être robotisé ou non. À ce jour, la plupart de ceux qui sont présents dans les entreprises ne le sont pas. L'assistance des mouvements se fait par restitution de l'énergie mécanique via des systèmes à élastiques ou à ressorts. Suivant

les cas, elle se porte sur les membres supérieurs, le dos, les membres inférieurs ou le corps entier.

## Préserver les travailleurs

De l'automobile au ferroviaire, en passant par le BTP ou le monde agricole, ces nouvelles technologies d'assistance physique passionnent. Très médiatisées, elles ne datent pourtant pas d'hier. Dans l'industrie, la première tentative sérieuse de fabrication d'un exosquelette remonte aux années 1960. Le Hardiman, de General Electric, devait multiplier la force de l'utilisateur et lui permettre de lever des charges de près de 700 kg ! Mais les obstacles



© Patrick Delapierre pour l'INRS

## PAROLE D'EXPERT

### Jean Theurel, responsable du programme exosquelette à l'INRS

Les recherches se multiplient à l'échelle mondiale pour établir des preuves concrètes quant aux avantages et aux risques liés à l'utilisation des exosquelettes pour la prévention des TMS. Bien que le potentiel d'atténuation des efforts musculaires par les exosquelettes apparaisse relativement prometteur, les évidences actuelles ne permettent pas d'approuver sans réserve leur utilisation pour la prévention des TMS. En effet, les études démontrent des effets indésirables lors de tâches de manutention, comme de nouvelles contraintes posturales ou une diminution des performances fonctionnelles. Les recherches s'efforcent par ailleurs de combler les principales lacunes dans les connaissances actuelles, comme l'impact des exosquelettes sur les coordinations musculaires, la survenue de la fatigue, ou les adaptations physiologiques à long terme. De nouvelles réflexions abordent également les dimensions cognitives, psychosociales et organisationnelles liées à l'usage de ces technologies en milieu professionnel.

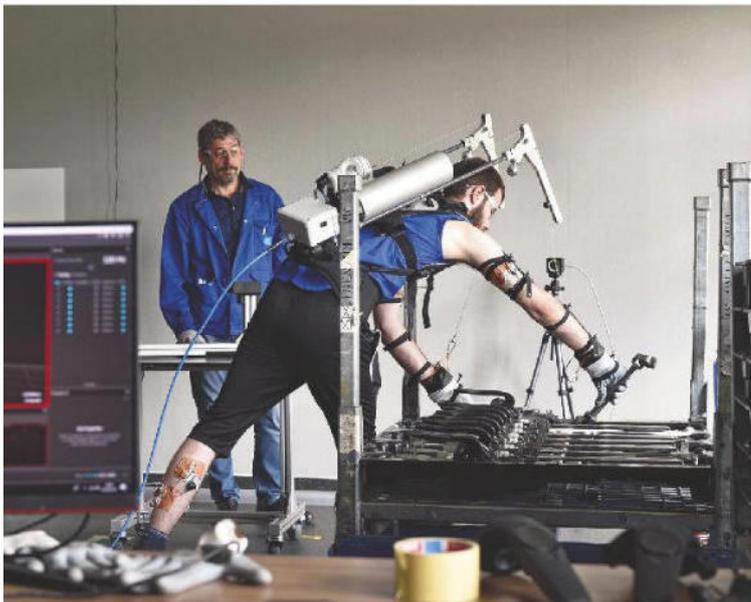
techniques rencontrés ont mis fin au rêve. Les développements ont ensuite principalement concerné le secteur médical, avec les exosquelettes de réhabilitation, ainsi que la Défense.

« Nous sommes passés du militaire au civil avec une première application pour les tireurs au râteau, en collaboration avec Colas, puis le développement d'un exosquelette spécialisé dans le port d'outils lourds. Aujourd'hui, la demande explose, avec l'espoir de trouver des solutions permettant de travailler mieux sans se faire mal », constate Serge Grygorowicz, P-DG de RB3D, concepteur et fabricant français. Un intérêt d'autant plus fort que la population active vieillit.

Peu à peu, le fantasme de l'exosquelette de science-fiction, lourd et imposant, visant à créer un homme « augmenté », s'est effacé

au profit de la recherche de dispositifs permettant avant tout de préserver le travailleur et de réduire sa fatigue. « Les développements récents montrent que l'on s'oriente vers des dispositifs plus souples, plus respectueux de la physiologie

Les frottements sur le corps peuvent générer de l'inconfort ou des irritations. Le poids des équipements peut provoquer l'augmentation des sollicitations cardiovasculaires. Il s'agit encore souvent d'objets technologiques



© Patrick Delapierre pour l'INRS

La phase d'étude et de tests d'un exosquelette est importante avant sa mise en place. Il est essentiel de veiller à son acceptation.

humaine. La technologie a évolué, mais il reste de réels enjeux d'amélioration, liés notamment au partage du contrôle avec l'opérateur et au respect des intentions motrices », souligne Nathanaël Jarrassé. Aujourd'hui, on trouve une trentaine d'exosquelettes disponibles dans le commerce. Le plus souvent, leur implantation dans l'entreprise se fait en tâtonnant, à partir de prototypes ou de versions à parfaire.

## Bien se préparer

Physiologiste à l'INRS, où de nombreuses études sont menées sur le sujet, Jean Theurel attire l'attention sur « les conséquences de l'utilisation des exosquelettes sur l'activité musculaire, l'équilibre, la posture ou encore les coordinations motrices », ainsi que sur « les incertitudes qui entourent leurs effets à long terme sur la santé ». « Les exosquelettes peuvent soulager certaines contraintes musculaires locales mais ne réduisent pas la répétitivité des gestes. Il existe également un risque de déplacer ces contraintes sur d'autres parties du corps », ajoute Laurent Kerangueven, ergonome à l'INRS.

encombrants. Il faut donc être vigilant aux risques de collision, avec une tierce personne ou un élément de l'environnement. Enfin, leur utilisation pourrait être source de risques psychosociaux par un accroissement de la charge mentale ou une diminution de l'autonomie au travail. Très tôt, il sera donc essentiel de travailler à leur acceptation et leur acceptabilité.

« Le processus qui conduit à l'acceptabilité est un processus complexe qui dépend de dimensions

croisées, explique Lien Wioland, responsable d'études à l'INRS. C'est également un processus fragile. La phase de déploiement est bien sûr cruciale. Faire adhérer demande un certain travail, mais ce qui est accepté ne l'est pas nécessairement à vie. Une modification peut tout remettre en question. »

Aujourd'hui, les entreprises tentées par l'acquisition d'un exosquelette sont face à un phénomène nouveau, dont elles doivent bien comprendre les intérêts et les limites pour la prévention des TMS. Les exosquelettes ne sont pas la solution unique contre les TMS, qui en réalité résultent d'une combinaison de facteurs. Ils ne sont pas non plus adaptés à tous les salariés. Souvent, un avis du service de santé peut permettre de s'affranchir de toute contre-indication.

## Mettre en place une culture exosquelette

Équiper ses salariés se prépare, avec une démarche allant de la définition du besoin d'assistance physique à l'intégration de l'exosquelette en situation réelle, pour garantir l'adéquation entre la solution d'assistance technique, l'opérateur et la tâche pour laquelle elle est envisagée. « Ces technologies apportent des résultats très spécifiques pour des situations de travail qui le sont tout autant. Il n'y a pas de bon exosquelette dans l'absolu. Mais il peut y avoir un bon exosquelette pour une situation donnée, tenant compte de toutes les séquences d'activité de l'opérateur et de son

## VUE DU TERRAIN

### GANT BIONIQUE

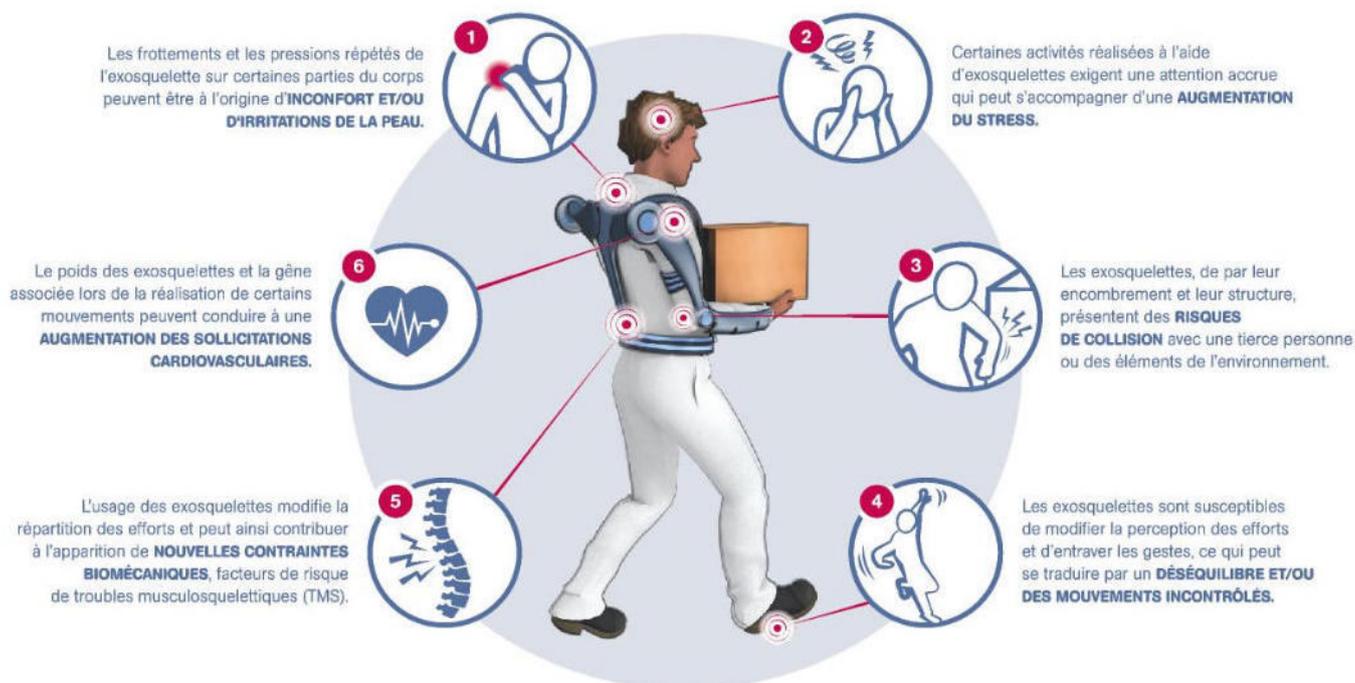
Ironhand est le premier exosquelette souple au monde. Qualifié de bionique par ses codéveloppeurs les sociétés Eiffage et Bioservo, ce gant doit permettre de prévenir l'apparition des TMS de la main en diminuant les efforts fournis par l'utilisateur. L'idée n'est pas de transformer le travailleur en un surhomme, mais de lui fournir confort et assistance. Lorsqu'un opérateur équipé se saisit d'un outil, la pression exercée sur les capteurs situés au bout des doigts déclenche les cinq moteurs, placés dans le sac à dos

complétant le dispositif. Ainsi actionnés, les tendons artificiels qui courent de part et d'autre de chaque doigt apportent une aide au mouvement et l'utilisateur a besoin de moins de force que d'ordinaire pour manier un marteau, attraper un parpaing, utiliser un tournevis, tenir un chalumeau... Cet exosquelette s'inscrit dans la tendance actuelle de recherche d'équipements respectueux de la physiologie humaine. Prochaine étape pour les développeurs : le bras bionique.



## Exosquelettes au travail : 6 points de vigilance

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



environnement », souligne Jean Theurel.

La réussite de la mise en place d'un exosquelette dans une entreprise passe invariablement par plusieurs étapes. La première est de se poser collectivement les bonnes questions. En constituant un groupe projet (direction, production, instances représentatives du personnel, service de santé au travail, préventeurs, opérateurs...), chargé notamment de l'analyse approfondie des situations de travail. Avant d'envisager l'usage d'un exosquelette comme solution de prévention, les autres pistes susceptibles de réduire la charge physique de travail doivent être étudiées. Une fois les tâches pouvant bénéficier de l'assistance physique déterminées, le groupe peut en valider le cahier des charges. Vient ensuite la phase d'évaluation de l'interaction entre l'exosquelette choisi et les futurs utilisateurs, qui doivent avoir été formés: appropriation, utilité, facilité d'emploi, impact sur le collectif, risques pour la sécurité.

Enfin, il est important d'évaluer la mise en œuvre en situation réelle.

À court, moyen et long termes, s'assurer que l'équipement répond aux besoins initialement identifiés et qu'il est accepté par tous. « Il y a une philosophie, une culture exosquelette à mettre en

« Ces technologies apportent des résultats très spécifiques pour des situations de travail qui le sont tout autant. »

place, témoigne Yonnel Giovanelli, chargé d'un projet d'expérimentation sur les nouvelles technologies d'assistance physique à la SNCF. L'arrivée d'un exosquelette amène à questionner et parfois

réorganiser le travail pour que cela fonctionne. »

En 2017, un groupe Afnor a publié un mode d'emploi pour évaluer l'interaction entre l'homme et un dispositif d'assistance de type exosquelette à partir d'une plateforme d'expérimentation d'une trentaine d'industriels, utilisateurs et fabricants. « On a besoin des retours d'expérience pour comprendre et anticiper les enjeux de ces nouvelles technologies », insiste Yonnel Giovanelli. « Tout cela demande du temps, reprend Jean-Jacques Atain-Kouadio. L'erreur serait de penser qu'il existe une réponse toute faite. Parfois, le besoin suscite beaucoup d'agitation. Les fabricants d'exosquelettes veulent vendre leur matériel et certaines entreprises aller trop vite. Il ne faut pas tomber dans ce piège. » ■ G. B.

### En savoir plus

■ **EXOSQUELETES AU TRAVAIL**: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs état des connaissances, INRS, ED 6311.

■ **ACQUISITION ET INTÉGRATION** d'un exosquelette en entreprise, INRS, ED 6315.

À télécharger sur [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

# Les tireurs au râteau à l'aube d'une nouvelle ère

Colas met la technologie au service de ses tireurs au râteau. L'Exopush, un exosquelette codéveloppé avec la start-up RB3D, est déployé dans plusieurs agences en France et à l'international. L'objectif : améliorer les conditions de travail et le confort des compagnons, qui ont été associés au processus de conception.

**EN CETTE CHAUDE MATINÉE** de juillet, le chantier a démarré tôt. Un chantier d'enrobé d'apparence classique, dans le centre-ville de Nancy, mais dont l'un des acteurs porte un équipement qui attire l'œil... Max Necker est tireur au râteau, un métier éminemment physique, qui n'a que très peu évolué en 80 ans. Chargé de mettre en œuvre manuellement l'enrobé sur la chaussée, il est équipé de l'Exopush, un exosquelette d'assistance à l'effort codéveloppé par Colas avec la société bourguignonne RB3D. Le dispositif comprend un manche télescopique détectant l'intention de mouvement et relié à un capteur de force qui multiplie par cinq la poussée exercée, ainsi qu'une jambe de force pour reporter les efforts au sol.

« Pour le moment, je ne l'utilise qu'une heure. On relève ce qui va, ce qui ne va pas. Je pense que ça va vraiment améliorer les conditions de travail, qu'il s'agisse des postures ou des efforts à fournir. Et tant mieux, car étaler 60 tonnes d'enrobé à la main dans la journée, ça use », explique Max Necker. Autour de lui, l'enthousiasme n'est pas encore partagé par tous. « Je n'y crois pas à leur truc », marmonne un pelleteur, estimant que tout cela perturbe trop l'organisa-

tion. « Il y a des contraintes de mouvement liées à l'équipement qui reste un peu encombrant. Il faut que l'équipe apprenne à travailler différemment », explique Christian Osvald, le chef de chantier.

L'Exopush est un projet qui a mis du temps à arriver à maturité. « Dès 2010, nous réfléchissions, avec un physiothérapeute, à un dispositif permettant de soulager les compagnons. Je suis allé voir ce qui se faisait au Japon, aux États-Unis. Puis j'ai rencontré la société française RB3D sur le salon InnoRobo, en 2011 », se souvient Marc Maranzana, directeur Open innovation et numérique chez Colas. Basée à Auxerre, la start-up travaille alors sur le développement d'exosquelettes pour l'armée et cherche des cas d'application civile. Le challenge est d'autant plus grand qu'il ne s'agit pas ici de postes de travail fixe.

## Des retours collaborateurs précieux

« Chaque chantier est un prototype. Tout change : la configuration, le matériel, les conditions environnementales... Nous sommes allés rencontrer les équipes, les observer, faire des mesures. Il était nécessaire de bien caractériser les tâches pour

voir ce que nous pouvions leur apporter », évoque Serge Grygorowicz, fondateur et dirigeant de RB3D. En parallèle, les travaux pour la défense se poursuivent et la technologie évolue. La phase d'échanges avec Colas, en France et en Suisse, conduit à l'élaboration des premiers prototypes. « Rapidement, nous les avons mis dans les mains de futurs utilisateurs sur le terrain. Les compagnons devaient être au cœur du processus de cocréation », reprend Marc Maranzana.

Au cours des phases de recherche et de développement, les retours des collaborateurs sont précieux. Il faut aller vers un exosquelette plus fonctionnel, plus efficace, mais également plus léger et plus maniable. La première version pesait plus de 40 kg contre à peine 8,4 kg pour la plus récente. En 2017, une présérie d'une quinzaine d'équipements arrive dans les agences. « Le harnais se fixe désormais sur la cuisse et non plus la hanche. C'est plus confortable. Un bloqueur installé sur la jambe de fixation permet également de moins ressentir le poids », constate Max Necker sur la dernière version testée.

« Nous avons une technologie

## UNE APPROCHE COLLECTIVE

Depuis février 2019, différentes configurations de chantiers Colas sur lesquels l'Exopush est mis en œuvre ont fait l'objet de travaux d'observation menés par une équipe de l'INRS. « Nous rencontrons les différents intervenants et avons des discussions autour de l'exosquelette. Nous animons également des confrontations collectives sur la base de séquences filmées, afin que chacun s'exprime », retrace Anaïs Ferry, en stage en psychologie du travail à l'INRS. Ces échanges, alors que l'entreprise est en phase

d'appropriation de la technologie, contribuent à la réflexion collective autour des réponses à apporter. « Sur de tels métiers, qui ont peu évolué jusqu'à présent, il faut laisser le temps à chacun de retrouver ses repères. Les évolutions techniques sur l'exosquelette se poursuivent en période de déploiement, explique Jean-Jacques Atain-Kouadio, ergonomiste à l'INRS. Les opérateurs sont formés à un outil qui n'est peut-être pas définitif. Sans cesse, il est nécessaire de réajuster les repères. »

mûre, prête à être déployée. Mais nous n'imaginions pas que l'innovation allait à ce point percuter l'organisation, reprend Marc Maranzana. Chaque agence a sa propre méthode d'appréhension des chantiers. Certaines ont immédiatement accepté l'Exopush, d'autres non. Nous avons donc lancé des études portant sur les interactions autour de l'outil et réfléchi à une stratégie d'intégration de l'exosquelette dans l'organisation. » Bien accompagner son

introduction sur le chantier, mais également s'intéresser aux situations dans lesquelles il est utilisé. Au niveau national, Colas, a récemment nommé un agent chargé du déploiement.

Retour à Nancy. Bernard Jung, chargé de prévention et instructeur Exopush pour Colas Nord-Est consacre une partie de son activité au suivi sur le terrain des opérateurs formés à l'exosquelette. Avec 30 ans d'exploitation derrière lui, il peut parler aux équipes libre-

ment. Il connaît le métier. « Ici, le tireur au râteau est convaincu. Il constate que, grâce à l'exosquelette, il a un réel gain postural avec une inclinaison de buste réduite. En revanche, les habitudes du collectif sont un peu bousculées. Avec l'équipe, il faut réfléchir à la façon de trouver un nouveau mode d'organisation », note-t-il.

### Un outil de séduction

Pour réussir la transition, toute la chaîne hiérarchique doit être mobilisée. Du chef de centre au chef de chantier et bien sûr les compagnons. « Si ces conditions ne sont pas réunies, on va dans le mur », insiste Bernard Jung. Autre erreur à ne pas commettre : dédier l'outil à une seule personne. « Nous avions au départ un volontaire qui était devenu l'"homme exosquelette". Cela a créé des jalousies, si bien que lui-même a pris du recul, indique Jean-Luc Travkine, adjoint d'exploitation Colas Nord-Est. Nous avons donc recherché de nouveaux volontaires. Depuis peu, nous réfléchissons même à des formations d'équipes. »

En aucun cas, le dispositif ne doit être imposé. « L'Exopush n'est pas destiné à être utilisé en permanence », ajoute Audrey Gay, chargée de prévention Colas Nord-Est. C'est l'un des enseignements fondamentaux des phases d'essais. Pour ne pas être perçu comme une contrainte, l'exosquelette n'est sorti que lorsque la configuration du chantier et la quantité de travail sont telles qu'il apporte une vraie valeur ajoutée. Avec un enjeu d'amélioration des conditions de travail, Colas perçoit le potentiel de séduction vis-à-vis des jeunes générations, que cette nouvelle dimension technologique pourrait attirer vers le métier. ■ G. B.

📷 La première version de l'Exopush pesait plus de 40 kg contre à peine 8,4 kg pour la plus récente. La façon dont il se porte a également été modifiée pour plus de confort.



© Philippe Costano pour l'INRS

(...)

## MOINS D'INCLINAISON

Les experts de Colas se sont intéressés à l'angle d'inclinaison du dos des tireurs au râteau pendant le travail. Avec un outil traditionnel, il est de 50 degrés (et parfois plus en fin de travail) contre 20 degrés lorsque l'opérateur utilise l'Exopush. La posture est donc moins contraignante, pour une maîtrise du geste équivalente, sans nécessité de forcer. Le rythme cardiaque est également sensiblement plus lent quand l'appareil est utilisé.

## ÉVOLUTIONS

Au fil des développements, RB3D a allégé le poids de la machine par l'intégration de matériaux en carbone et aluminium et réduit la longueur de l'outil afin qu'il soit moins encombrant sur le chantier et se range facilement dans les véhicules. Certains ajouts récents, au niveau de la jambe de force, permettent à l'opérateur de s'équiper et se déséquiper plus rapidement et d'avoir une plus grande liberté de mouvement.

# L'homme préservé plutôt que l'homme augmenté

La SNCF veut mettre un frein à la pénibilité des travaux de maintenance du matériel roulant ferroviaire. Développé avec la société Ergosanté Technologie pour répondre aux exigences de travail, un exosquelette modulaire, façon couteau suisse, arrive dans les technicentres. Objectif : préserver la santé physique de l'agent, sans chercher à en faire un surhomme.

**EN MATIÈRE DE NOUVELLES** technologies d'assistance physique, la SNCF se défend d'avoir cédé à un quelconque effet de mode. Si un exosquelette, développé en partenariat avec la société Ergosanté Technologie, et visant à réduire la charge physique des agents de maintenance du matériel roulant ferroviaire, est sur le point d'être commercialisé, il est loin d'être sorti du chapeau. Avant de se lancer, d'autres solutions, plus classiques, ont été envisagées. Au technicentre de maintenance

de Chambéry, Sébastien Marmillod s'apprête à remplacer des semelles et garnitures de freins. Une opération particulièrement éprouvante physiquement. Équipé de la toute dernière version de l'exosquelette encore en phase de test, il descend en fosse. « Le dispositif est assez ergonomique. Même en environnement contraint, je conserve de la souplesse dans mes déplacements. Tout est fluide, y compris lorsqu'il faut donner des coups de marteau, souligne l'agent de maintenance. Une

semelle de frein pèse 12 kg, qu'il faut porter à bout de bras. Avec l'exosquelette, on ne s'en rend plus compte. Et quelle évolution depuis le prototype que j'ai testé l'année dernière! »

## Le couteau suisse de l'agent de maintenance

C'est en 2014 que la SNCF a identifié les nouvelles technologies d'assistance physique que sont les exosquelettes et les robots collaboratifs comme axes de progrès potentiels. Yonel Giovanelli, responsable du pôle ergonomie et facteurs organisationnels et humains à la Direction du matériel, prend en charge, dès 2015, un projet d'expérimentation. Il réalise de nombreuses études ergonomiques, effectue un tour d'horizon complet du marché et teste les exosquelettes disponibles qui, pour l'essentiel, sont encore encombrants, lourds et difficiles à régler seul. « Je n'ai pas trouvé d'exosquelette adapté à nos exigences de travail et à l'extrême diversité des situations rencontrées par nos agents, explique-t-il. C'est pourquoi nous avons eu l'idée de concevoir un exosquelette modu-

📷 Même en environnement contraint, lors des interventions en fosse, le dispositif permet à l'opérateur de conserver une souplesse dans ses déplacements.



© Guillaume J. Pissson pour l'INRS

## BESOIN ET SUIVI

L'analyse de l'existant a permis d'établir un cahier des charges fonctionnel avec cinq critères principaux retenus pour l'exosquelette : la légèreté, la facilité d'utilisation, l'adaptabilité aux différentes méthodologies, le caractère modulaire et le coût. Localement, le médecin du travail donnera son aval pour l'utilisation de l'exosquelette et assurera un suivi. La présence du préventeur d'établissement et un suivi national régulier permettront d'apprécier l'évolution dans le temps de la situation et d'identifier de nouveaux cas d'usage.

## MAINTENANCE

La maintenance de l'exosquelette nécessite plusieurs niveaux d'intervention : au quotidien par l'utilisateur, des vérifications régulières de l'établissement, un check-up complet chez le fabricant avec une régularité à définir.



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS

laire de type couteau suisse, que l'opérateur règle lui-même pour modifier l'assistance en fonction de la tâche à réaliser. »

L'exosquelette que porte Sébastien Marmillod réunit à lui seul cinq fonctions : assistance à l'extension des cervicales, au maintien des bras en l'air, à la flexion du tronc vers l'avant, à la manutention (jusqu'à 15 kg) et au port des outils lourds. En grande partie composé d'éléments imprimés en 3D, il reste relativement léger – autour de 6,5 kg – et s'adapte aux différentes morphologies. « Je sais quels réglages faire et à quel moment. C'est assez intuitif. Et puis ça donne une dimension technologique intéressante à un travail parfois ingrat », évoque l'opérateur.

Toutes les nuits, les agents de maintenance contrôlent en binôme deux rames de 7 ou 8 voitures. « Le changement des semelles de frein est une opération très courante, que je ne suis plus en mesure de réaliser sans l'exosquelette, m'étant blessé à l'épaule lors d'un accident du travail », poursuit-il. Dans beaucoup d'entreprises, les activités de maintenance restent accidentogènes. Nombreux sont

les opérateurs qui souffrent à leur poste de travail. Pour la SNCF, s'intéresser aux nouvelles technologies d'assistance physique n'a jamais été un prétexte pour répondre au fantasme de l'homme augmenté. Oubliez Iron man, ici, on parle d'homme préservé.

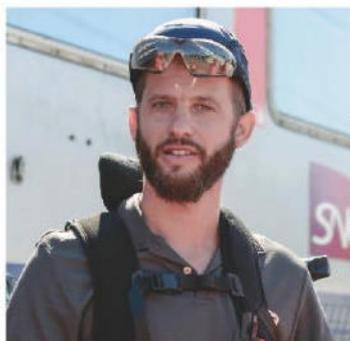
### Intégrer des critères organisationnels et humains

Dès 2017, un groupe pluridisciplinaire (service des méthodes, ergonome, psychologue du travail, médecin du travail, utilisateurs...) a été formé pour suivre la conception technique et les tests des différents prototypes sur le terrain, avec plusieurs dizaines d'agents. Ces retours ont permis au partenaire Ergosanté Technologie de faire évoluer la solution. Jusqu'à la version testée aujourd'hui. « Il fallait avancer avec prudence car le port de l'exosquelette n'est pas neutre pour le corps et le fonctionnement des muscles. On n'en connaît pas les effets à moyen et long termes. Dans la démarche de conception, nous avons intégré, au-delà des données purement techniques, les critères

📷 L'exosquelette multiassistance permet notamment de réduire les efforts pour porter des pièces lourdes telles que les semelles de frein.

organisationnels et humains », souligne Yonel Giovannelli.

À la veille du déploiement dans les technocentres, l'ergonome est plus que jamais convaincu de la nécessité de continuer à œuvrer pour la mise en place d'une culture exosquelette dans l'entreprise. Il faut démythifier l'objet. Très tôt, il a d'ailleurs veillé à associer les organisations syndicales au projet. Les tests ont été réalisés avec des opérateurs équipés de capteurs pour les mesures physiologiques et biomécaniques, mais également via des questionnaires visant à évaluer le ressenti des agents. « Il fallait aller dans les établissements. Au niveau national, on ne connaît pas la situation projetée. Un exosquelette n'est pas un EPI. Ce n'est pas une clé de 12. C'est une interface entre l'agent et le travail », insiste l'ergonome. Chaque organisation a des risques et des contraintes qui lui sont propres. En fonction des cas, l'exosquelette pourra être dédié à un agent, à une équipe, à une tâche... Rien n'est prédéterminé. Pour cadrer sa démarche d'intégration, la SNCF demande aux établissements de rédiger une méthode de sécurité commune. Cela vaut pour l'exosquelette développé avec Ergosanté Technologie comme pour toutes les nouvelles technologies d'assistance physique qui seront proposées. Sont-elles adaptées à la situation ? Quels en sont les avantages et les inconvénients ? De quelle façon nécessitent-elles de requestionner le travail ? Dans chaque cas, les réponses devront se construire avec le collectif. En s'assurant de rester, du point de vue de la sécurité, globalement au moins équivalent à la situation antérieure, sans générer d'autres risques. ■ G. B.



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS

## MAINTIEN DANS L'EMPLOI

Au cours d'une intervention de maintenance, Sébastien Marmillod s'est gravement blessé à l'épaule. « J'ai été sorti du roulement de nuit car je ne suis plus en mesure de changer les semelles de frein. Du coup, j'ai perdu mes primes. C'est ma vie professionnelle et ma vie personnelle qui en pâtissent », explique-t-il. S'il fait partie des premiers testeurs de l'exosquelette, ce n'est pas un hasard. Il en va de son maintien dans l'emploi. « Avant d'avoir un problème, on se sent costaud », poursuit l'opérateur de maintenance. Surtout quand on est jeune. Il y a encore un vrai travail de prise de conscience à faire. L'exosquelette n'est pas un jouet. Pour tous, il peut permettre de se préserver. À mon niveau, c'est ce que j'essaie de transmettre. »

PESSAC

# Les agents municipaux peuvent s'équiper d'exosquelettes

La mairie de Pessac lance une expérimentation en dotant ses agents municipaux d'exosquelettes, dans une démarche de bien-être au travail

Esther Surand  
gironde@sudouest.fr

**A** la manière d'un sac à dos, Jean enfle les sangles, d'une épaule à l'autre, et les resserre à hauteur du torse. « Avec modération », précise l'agent municipal à la mairie de Pessac, formé en amont à l'utilisation de cet équipement innovant. En deux minutes chrono, et avec deux kilos supplémentaires sur le dos, il est prêt à commencer son travail : soulever des plaques de fer - d'une dizaine de kilos chacune - et les fixer au sol à l'aide de goupilles afin de déplier les tribunes de la salle omnisports de Bellegrave.

Trois exosquelettes sont mis à disposition des agents municipaux dans le cadre d'une expérimentation qui s'inscrit dans un projet de qualité de vie au travail impulsé par la mairie de Pessac. Conçus à Tarbes (65) par l'entreprise Human Mechanical Technologies (HMT), fondée en 2017, ces dispositifs d'assistance physique (DAP) accompagnent les mouvements et permettraient de soulager le dos, en diminuant la sollicitation des muscles lombaires, à l'aide d'un mécanisme de flexions assistées. Le haut du corps serait comme porté dans les actions répétitives, par exemple le port de charges, sans pour autant gêner la marche.

« Ça aide à ne pas trop forcer »  
Tous les week-ends, à Pessac, Jean et



Équipé d'un exosquelette, l'agent est assisté dans ses mouvements de flexions. THIERRY DAVID / SO

son collègue Medhi montent les gradins. Samedi dernier, cela faisait deux semaines que l'exosquelette s'était rajouté à l'équipe. Et ça se ressentait sur le plan physique : « Ça aide vraiment au niveau du dos et des lombaires, admet Medhi, agent

**« Ce n'est pas comme un manteau que l'on enfle, ça contraint les mouvements »**

municipal depuis 2019. Je pense que, à force de prendre le rythme, on pourrait même l'utiliser pour d'autres tâches. C'est un bon début ! » Son collègue l'admet aussi, « ça aide à ne pas trop forcer », même s'il

s'avère moins convaincu. « Honnêtement, je ne l'utiliserai pas tous les jours car, c'est un peu gênant. Ce n'est pas comme un manteau que l'on enfle, ça contraint les mouvements », partage Jean, qui vient de l'utiliser pour la deuxième fois en situation réelle. Après avoir déchargé et fixé toutes les plaques d'acier sur le sol, il le concède, « c'est peut-être simplement une question d'habitude ».

**50/50**

Et c'est là tout l'objet de l'expérimentation : « Savoir si c'est vraiment adapté et supportable pour les agents. » Selon Pascale Pavone, adjointe aux ressources humaines à la mairie de Pessac, pour le moment, « les premiers retours, c'est du 50/50,

certains sont plus nuancés, et d'autres se sentent réellement moins fatigués et moins douloureux ». D'après la mairie, ces exosquelettes pourraient être une solution pour favoriser le bien-être au travail en permettant aux agents d'adopter les bonnes postures et, in fine, « diminuer les troubles musculo-squelettiques qui peuvent occasionner des arrêts ».

Pour cela, l'adjointe espère que les employés municipaux pourront pleinement utiliser le matériel de façon autonome : « S'il y a obligation de le porter, il n'y aura pas d'effet. Nous avons à cœur de permettre aux agents de se saisir de leur santé. » L'expérimentation, prolongée, devrait encore durer quelques semaines.



# Des hommes bioniques dans nos jardins

PUBLIE LE 29/04/2020 Par SOPHIE PALISSE • Club : Club Techni.Cités



Unep

**Contraintes posturales, port de charges lourdes, exposition aux vibrations, etc. Les paysagistes s'exposent à des nuisances physiques pouvant les amener à avoir des troubles musculo-squelettiques. Les exosquelettes peuvent limiter les risques.**

Les travaux d'entretien des espaces verts soumettent les jardiniers et les paysagistes à des nuisances posturales et articulaires répétitives et prolongées : taille des haies, plantations et arrachage des végétaux, préparation des sols, port de charges lourdes, exposition à des bruits nocifs et aux vibrations transmises par les tondeuses, motobineuses, etc.

## Utilisation d'exosquelettes : tests en cours

Afin de réduire ces risques et notamment les troubles musculo-squelettiques (TMS) auxquels s'exposent les paysagistes, les commissions Innovation et Qualité-sécurité-environnement de l'Union nationale des entreprises du paysage (Unep) ont mené une réflexion sur l'utilisation d'exosquelettes. Ces structures mécaniques qui doublent celle du squelette humain et lui confèrent des capacités physiques qu'il n'a pas (ou plus) amélioreraient les conditions de travail des jardiniers.

Fonctionnant sans batterie ni pile, « l'exosquelette s'enfile comme un sac à dos et s'adapte à chacun », commente Marc Mouterde, président de la commission Innovation de l'Unep. Seuls quelques réglages simples sont à réaliser. « Un briefing en amont est tout de même nécessaire pour un salarié qui ne connaît pas du tout l'appareil car certaines configurations sont à respecter pour que le système soit optimisé », ajoute Anthony Guitton, chargé de projet innovation de l'Unep.

« Des tests avec deux modèles spécifiques à la taille des haies ont été organisés avec les entreprises Exhaus et Gobio, fournisseurs d'exosquelettes », explique Marc Mouterde. Il en ressort une diminution importante de la fatigue physique, un gain de l'amplitude de travail et une hausse de la constance de travail pour les utilisateurs. Outre le fait que l'appareil soit assez imposant, une des difficultés principales reste le prix qui s'élève à environ 5 000 euros. « Pour contourner ce problème, certains fournisseurs se sont tournés vers Kiloutou et Loxam qui louent le matériel aux paysagistes », poursuit Marc Mouterde.

Une collaboration avec la sécurité sociale agricole (la MSA) est en projet pour étudier les conséquences à long terme de l'utilisation de l'appareil sur la santé des salariés du privé.

## Sécurité et santé des agents : points de vigilance

Les exosquelettes peuvent soulager les opérateurs mais, d'après l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS), leur usage n'est pas sans risque et pose de nouvelles questions quant à la sécurité et la santé des agents des espaces verts. D'une part, l'utilisateur peut être exposé aux risques classiques inhérents aux machines : risques mécaniques, électriques, thermiques, liés au bruit et aux vibrations, etc. D'autre part, les changements apportés dans les façons de travailler peuvent être source de postures contraignantes, de stress, de fatigue cognitive ou encore de perte d'équilibre ou de chute.

« Les exosquelettes existant à l'heure actuelle ne peuvent pas apporter de réponse à l'ensemble des contraintes physiques auxquelles sont exposés les salariés. Ils vont permettre de proposer une assistance physique qui va être spécifique à une tâche ou à une situation de travail », indique Laurent Keranguéven, expert d'assistance conseil à l'INRS. C'est pourquoi il est essentiel de mener une réflexion structurée et collective au préalable qui débute par la caractérisation du besoin d'assistance physique. Une étude est en cours, et les résultats devraient être publiés à la fin de l'année.

## Retours d'expérience

« Nous avons entamé une discussion pour le référencement de la société et de ses produits auprès de la branche médicale de l'Ugap, ce qui faciliterait l'accès aux commandes pour tous les acteurs des différentes fonctions publiques. Mais cette démarche sera probablement assez longue », expose Benoit Sagot-Duvaurox, responsable de l'activité chez Gobio. Ces marchés représentent pour les spécialistes des exosquelettes, et particulièrement dans le domaine de l'entretien des espaces verts, « un potentiel intéressant, confirmé par l'expérimentation réalisée auprès de l'Unep », ajoute-t-il.

Gobio a déjà commencé à commercialiser des exosquelettes auprès du conseil régional de Normandie, qui s'apprête à engager une expérimentation pour ses agents de maintenance dans un premier temps, et sur l'agglomération de La Roche-sur-Yon, en Vendée.

### REFERENCES

- Exosquelettes : ce qu'il faut retenir. [www.inrs.fr/risques/exosquelettes](http://www.inrs.fr/risques/exosquelettes)
- « 10 idées reçues sur les exosquelettes », Guide INRS, ED 6295, [bit.ly/3eLesra](http://bit.ly/3eLesra)
- « Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise », Guide INRS, ED 6315, [bit.ly/3eMIYkr](http://bit.ly/3eMIYkr)