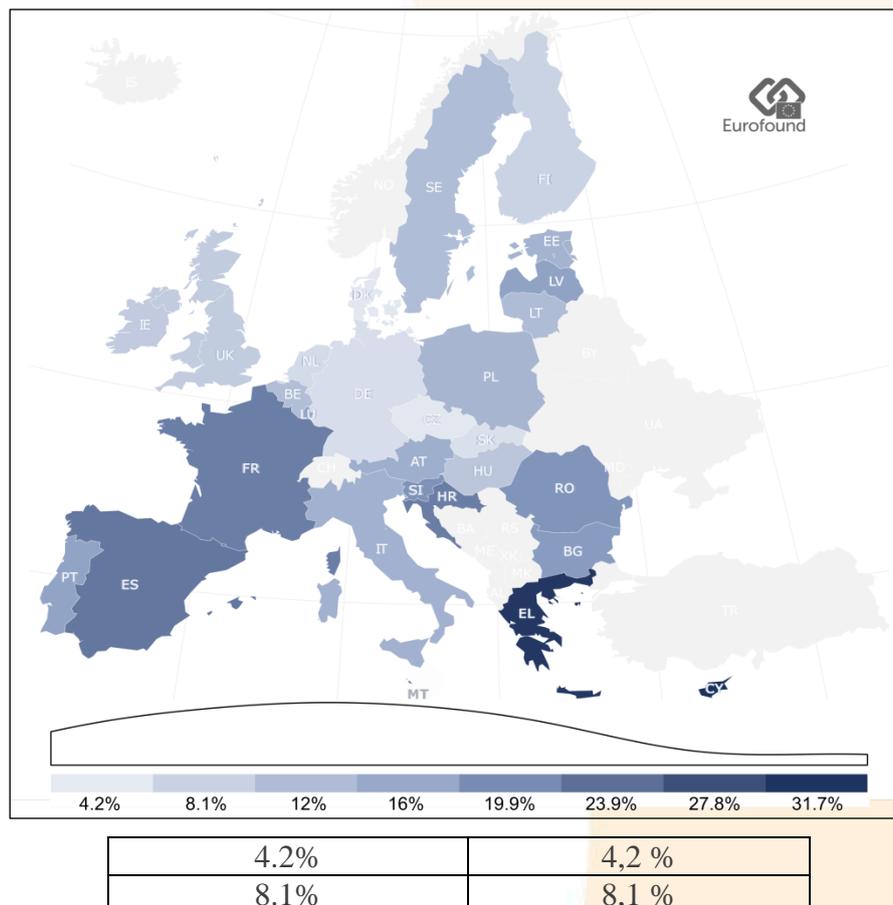


LES CONSÉQUENCES DE L'UTILISATION D'EXOSQUELETTES EN TERMES DE SÉCURITÉ ET DE SANTÉ AU TRAVAIL

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 Europe¹. 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)



¹ 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.

12%	12 %
16%	16 %
19.9%	19,9 %
23.9%	23,9 %
27.8%	27,8 %
31.7%	31,7 %

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 leurs applications 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.

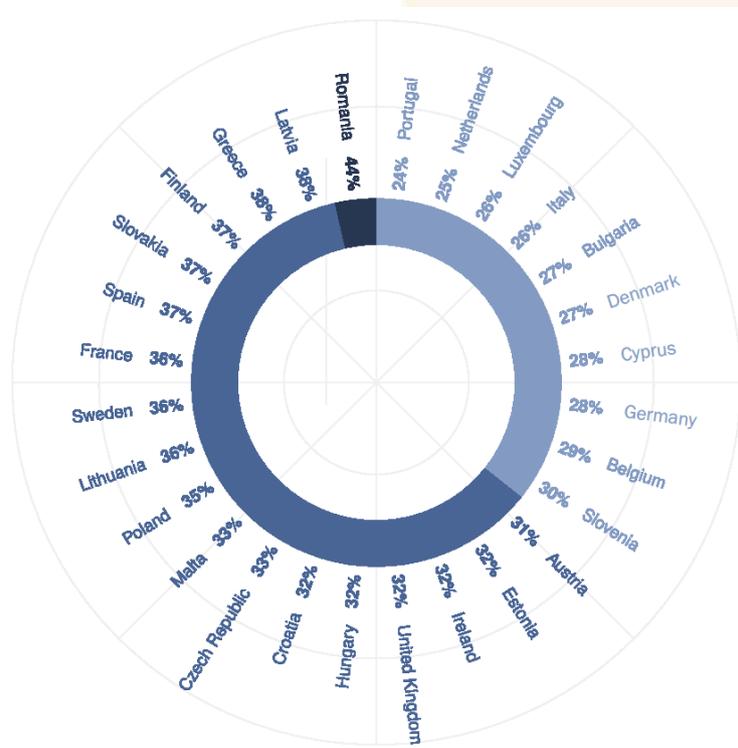
Domaines d'application sur les lieux de travail

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.

Synthèse

Les exosquelettes suscitent actuellement beaucoup d'intérêt. Malgré leur potentiel apparemment prometteur, il conviendrait de s'interroger sur leur application dans un large éventail de domaines. La question qui se pose est de savoir si les exosquelettes seront largement utilisés à l'avenir pour protéger les travailleurs contre le risque de blessures de surcharge ou pour faire des économies sur les processus de travail. Selon les développements techniques, les exosquelettes peuvent devenir un outil standard pour les processus de manutention ou rester un produit de niche pour des applications très spécifiques. Toutefois, l'intérêt commercial actuel porté aux exosquelettes peut également poser un problème pour le développement à venir, car les approches économiques ou axées sur les performances risquent d'être privilégiées, au détriment de la sécurité professionnelle. Les exosquelettes peuvent être utilisés en tant que dispositifs techniques, médicaux ou de protection individuelle, en fonction de leur usage prévu sur le lieu de travail. Toutefois, en raison de la multiplicité des fonctionnalités, de la conception et des applications, il n'existe pas de définition uniforme, ce qui complique leur mise en œuvre dans la pratique en ce qui concerne leur certification. Bien qu'il existe de nombreuses études sur les exosquelettes qui tiennent compte de différents aspects en termes de facilité d'utilisation et de fonctionnalité, les effets sur la santé des employés sont actuellement mal compris. En particulier, les effets à long terme des exosquelettes sur les paramètres physiologiques, psychosociaux et biomécaniques sont méconnus. De futures études devraient porter sur les effets à long terme des exosquelettes sur le lieu de travail afin d'obtenir des résultats plus fiables. Il n'est pas recommandé d'utiliser des exosquelettes en vue d'améliorer l'ergonomie des lieux de travail fixes, mais il existe un grand nombre de lieux de travail non fixes ou mobiles où il est impossible de mettre en place des mesures ergonomiques. Dans ce contexte, les exosquelettes pourraient constituer une approche prometteuse pour réduire les TMSLT à l'avenir.

Auteurs: Peters, M. et Wischniewski, S. (2019). Federal Institute for Occupational Safety and Health, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund, Allemagne.

Gestion du projet: Annick Starren, Emmanuelle Brun, Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA), 2019

Nous remercions le Dr. Lars Adolph, le professeur et Dr. Ute Latza et le groupe des points focaux de l'EU-OSHA pour leurs analyses critiques et leurs précieuses suggestions. Nous tenons aussi à remercier EUROFOUND de nous avoir permis d'utiliser les illustrations contenues dans ce document.

Le présent article a été commandé par l'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA). Son contenu, y compris tout avis et/ou conclusion exprimé, est celui de ses seuls auteurs et ne reflète pas nécessairement l'avis de l'EU-OSHA.

Références

- 89/391/CEE. Directive du Conseil du 12 juin 1989 concernant la mise en œuvre de mesures visant à promouvoir l'amélioration de la sécurité et de la santé des travailleurs au travail; Le Conseil des Communautés Européennes.
- 89/686/CEE. Directive du Conseil, du 21 décembre 1989, concernant le rapprochement des législations des États membres relatives aux équipements de protection individuelle. Le Conseil des Communautés Européennes.
- 93/42/CEE. Directive 93/42/CEE du Conseil du 14 juin 1993 relative aux dispositifs médicaux. Le Conseil des Communautés Européennes.
- 2006/42/CE. Directive 2006/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 17 mai 2006 relative aux machines et modifiant la directive 95/16/CE (refonte). Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne.
- 2016/425. Règlement (UE) 2016/425 du Parlement européen et du Conseil du 9 mars 2016 relatif aux équipements de protection individuelle et abrogeant la directive 89/686/CEE du Conseil. Le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne.
- Abdoli-E, M., Agnew, M. J. and Stevenson, J. M. (2006). An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clinical Biomechanics*, 21 (5), 456-465.
- Baltrusch, S. J., van Dieën, J. H., van Bennekom, C. A. M. et Houdijk, H. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106.
- Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe. *Best Practice & Research in Clinical Rheumatology*, 29 (3), 356-373.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K. et de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217.
- Collins, J. D. et O'Sullivan, L. W. (2015). Musculoskeletal disorder prevalence and psychosocial risk exposures by age and gender in a cohort of office based employees in two academic institutions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 46, 85-97.
- Constantinescu, C., Muresan, P.-C. Et Simon, G.-M. (2016). JackEx: the new digital manufacturing resource for optimization of exoskeleton-based factory environments. *Procedia CIRP*, 50, 508-511.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S. et O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59 (5), 671-681.
- INRS. (2018). Exosquelettes au travail: impact sur la santé et la sécurité des opérateurs – état des connaissances. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Disponible sur le site de l'INRS à l'adresse: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206311>
- INRS. (2019). Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise: Guide pour les préventeurs. Paris: Institut National de Recherche et de Sécurité. Disponible sur le site de l'INRS à l'adresse: <http://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206315>
- Eurofound (2012). *Cinquième enquête européenne sur les conditions de travail*. Luxembourg: Office des publications de l'Union européenne.
- Eurofound (2019). Enquête européenne sur les conditions de travail 2015. Bruxelles: Eurofound
Disponible sur le site d'Eurofound à l'adresse:
<https://www.eurofound.europa.eu/data/european-working-conditions-survey>.
- Gams, A., Petrič, T., Debevec, T. et Babič, J. (2013). Effects of robotic knee exoskeleton on human energy expenditure. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (6), 1636-1644.
- Gilotta, S., Spada, S., Ghibaud, L., Isoardi, M. et Mosso, C. (2018). *Acceptability beyond Usability: A Manufacturing Case Study*. Communication présentée au Congrès de l'Association internationale d'ergonomie (IEA)

- Godwin, A. A., Stevenson, J. M., Agnew, M. J., Twiddy, A. L., Abdoli-Eramaki, M. et Lotz, C. A. (2009). Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39 (1), 121-126.
- Gopura, R. A. R. C. et Kiguchi, K. (2009). *Mechanical Designs of Active Upper-limb Exoskeleton Robots: State-of-the-art and Design Difficulties*. Communication présentée à l'ICORR, ICORR 2009: IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics.
- Graham, R. B., Agnew, M. J. et Stevenson, J. M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40 (5), 936-942.
- Hensel, R., Keil, M., Mücke, B. et Weiler, S. (2018). Chancen und Risiken für den Betrieblichen Einsatz von Exoskeletten in der betrieblichen Praxis. *ASU Zeitschrift für medizinische Prävention*, 53, 654-661.
- Herr, H. (2009). Exoskeletons and orthoses: classification, design challenges and future directions. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6 (21).
- Holewijn, M., Hens, R. et Wammes, L. (1992). Physiological strain due to load carrying in heavy footwear. *European Journal of Applied Physiology Occupational Physiology*, 65 (2), 129-134.
- ISO 10218-1:2011. Robots et dispositifs robotiques — Exigences de sécurité pour les robots industriels — Partie 1: Robots Genève: Organisation internationale de normalisation.
- ISO 13482:2014. Robots et composants robotiques — Exigences de sécurité pour les robots de soins personnels. Genève: Organisation internationale de normalisation.
- ISO/TS 15066:2016. Robots et dispositifs robotiques — Robots coopératifs. Genève: Organisation internationale de normalisation.
- Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Jia, B. et Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: part II — 'unexpected' effects on shoulder motion, balance, and spine loading. *Applied Ergonomics*, 70, 323-330.
- Liedtke, M. et Glitsch, U. (2018). Exoskelette — Verordnung für persönliche Schutzausrüstung. *sicher ist sicher*, 3, 110-113.
- Lotz, C. A., Agnew, M. J., Godwin, A. A. et Stevenson, J. M. (2009). The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *Journal of Electromyography Kinesiology*, 19 (2), 331-340.
- Schick, R. (2018). Einsatz von Exoskeletten in der Arbeitswelt. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie*, 68 (5), 266-269.
- Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T. et Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 211-217.
- Viteckova, S., Kutilek, P. et Jirina, M. (2013). Wearable lower limb robotics: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 33 (2), 96-105.
- Weston, E. B., Alizadeh, M., Knapik, G. G., Wang, X. et Marras, W. S. (2018). Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Applied Ergonomics*, 68, 101-108.
- Whitfield, B. H., Costigan, P. A., Stevenson, J. M. et Smallman, C. L. (2014). Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44 (1), 39-44.
- Yang, C., Zhang, J., Chen, Y., Dong, Y. et Zhang, Y. (2008). A review of exoskeleton-type systems and their key technologies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 222 (8), 1599-1612.
- Zurada, J. (2012). Classifying the risk of work related low back disorders due to manual material handling tasks. *Expert Systems with Applications*, 39 (12), 11125-11134.