

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

AUTEURS :

J. Theurel¹, J.J. Atain Kouadio¹, L. Kerangueven²

1. Département Homme au travail, INRS

2. Département Expertise et conseil technique, INRS

EN RÉSUMÉ

Les exosquelettes, déployés dans de nombreux secteurs d'activité, suscitent un espoir légitime en termes de prévention des troubles musculosquelettiques (TMS) mais aussi d'amélioration des conditions de travail. Leur usage soulève toutefois encore de nombreuses questions de santé et de sécurité. De l'analyse de la situation de travail au déploiement des exosquelettes en entreprise, une démarche continue, structurée et collective, paraît indispensable. Le rôle des services de santé au travail (SST) est ainsi primordial. Cet article traite des avantages et des limites de l'usage d'exosquelettes professionnels pour la prévention des TMS. Abordant des aspects théoriques, pratiques et opérationnels, son objectif est d'aider les SST à accompagner efficacement les entreprises dans leur démarche d'acquisition et d'intégration d'un exosquelette.

MOTS CLÉS

Exosquelette / Trouble musculosquelettique / MS / Conditions de travail / Ergonomie / Pathologie articulaire



© LOUIS MARTIN POUR L'INRS

L'impact des activités de travail dans la survenue des troubles musculosquelettiques (TMS) fait l'objet d'un large consensus depuis de nombreuses années. Si l'industrie et la construction concentraient jusque récemment la majorité des cas de TMS, d'autres secteurs, comme celui des soins et aide à la personne, sont désormais particulièrement concernés par ces problématiques. En 2018, les TMS représentaient plus de 87 % des maladies professionnelles reconnues [1]. Parmi les TMS recon-

nus, plus de 90 % concernent les membres supérieurs (notamment tendinopathie de la coiffe des rotateurs, épicondylite latérale, syndrome du canal carpien). Par ailleurs, les lombalgies représentent également 20 % des accidents du travail [2].

L'ensemble de ces atteintes de l'appareil locomoteur se manifeste généralement par des raideurs, des douleurs musculo-articulaires ou des pertes de fonctions (force, mobilité) pouvant compromettre le maintien au travail et plus large-

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

ment en emploi. Le vieillissement de la population active, l'intensification du travail, l'exposition à des facteurs de risques psychosociaux et la persistance de contraintes biomécaniques élevées (efforts, répétitivité, postures extrêmes) rendent encore plus prégnante la question de la prévention de ces troubles.

L'aménagement des situations de travail visant à limiter l'exposition des opérateurs à ce type de contraintes a, par conséquent, fait l'objet de nombreux travaux. L'automatisation et la mécanisation des tâches les plus exigeantes figurent parmi les pistes de prévention déployées en ce sens. Cependant, malgré les progrès considérables effectués ces dernières années dans ce domaine, les solutions proposées ne semblent pas toujours en mesure de répondre pleinement à l'ensemble des situations de travail. Dans de nombreux cas, les opérateurs restent durablement exposés aux efforts intenses ainsi qu'aux postures contraignantes. Chaque année en France, 40 % d'entre eux souffrent ainsi de douleurs au niveau du dos ou des épaules [1].

Théoriquement associées à la réduction de la charge physique et des facteurs de risques biomécaniques de TMS, les nouvelles technologies d'assistance physique ont fait naître un espoir légitime d'amélioration des conditions de travail. Parmi ces innovations, les exosquelettes sont apparus particulièrement prisés par les entreprises car, au-delà des enjeux de productivité, la promesse de ces systèmes est de limiter l'exposition des opérateurs aux contraintes biomécaniques de leurs postes, tout en préservant leur savoir-faire ainsi que leurs capacités d'action face à la variabilité des situations de travail. Pour autant, si ces technologies

semblent effectivement à l'origine de bénéfices pour les utilisateurs, notamment en termes de réduction des efforts musculaires, elles exposeraient également les opérateurs équipés à des effets non désirés, qui pourraient être à l'origine de gênes, voire de nouveaux facteurs de risques professionnels [3]. Par ailleurs, l'introduction des exosquelettes dans l'entreprise peut occasionner des changements dans la situation comme dans l'organisation de travail, susceptibles de générer des réactions contrastées des opérateurs, allant de l'adhésion au refus. Pour l'heure, et malgré leur potentiel, les exosquelettes ne doivent donc pas être considérés comme une solution miracle car leur usage soulève encore de nombreuses questions de santé et de sécurité. De la définition du besoin d'assistance physique au déploiement de ces technologies dans l'entreprise, leur intégration nécessite une démarche structurée et collective, impliquant notamment les services de santé au travail (SST). Cet article traite des éléments théoriques, pratiques et opérationnels à connaître avant d'envisager les exosquelettes comme une solution complémentaire des démarches de prévention des TMS mises en place par une entreprise.

LES EXOSQUELETTES À USAGE PROFESSIONNEL

Pensés dès la fin du XIX^e siècle, les exosquelettes peuvent être définis comme une structure externe, revêtue par un utilisateur, et visant à améliorer ses capacités motrices. En 1968, General Electric concevait « Hardiman », le premier exosquelette de l'ère moderne à des fins d'applications professionnelles.

Conçu pour manipuler des charges de près d'une demi-tonne, son encombrement, son poids et son manque de fonctionnalité ont probablement grandement contribué à condamner son usage dans les entreprises.

Profitant aujourd'hui de la plasticité et de la légèreté des matériaux composites modernes et des avancées accomplies dans le domaine de la robotique, les exosquelettes ont récemment intégré les entreprises françaises. Les premiers exemples d'usage rapportés dans le milieu industriel datent de 2015. Le nombre d'exosquelettes disponibles sur le marché, ou en développement, est aujourd'hui en plein essor, avec une demande croissante de nombreux secteurs d'activité, tels que l'industrie, le BTP (bâtiment-travaux publics), la logistique, la santé ou encore l'agroalimentaire.

Si les contraintes d'utilisation varient, les problématiques d'assistance, elles, sont souvent similaires. La majorité des exosquelettes du marché sont conçus pour soulager le redressement du dos ou l'élévation des membres supérieurs. Néanmoins, d'autres exosquelettes sont récemment apparus sur le marché. Ils visent notamment à assister la préhension manuelle, l'extension de la nuque voire le corps entier.

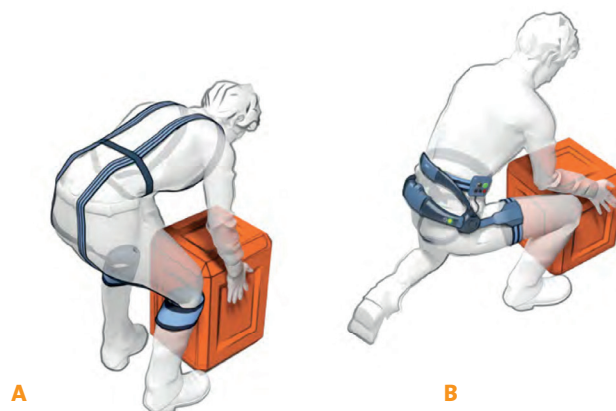
LES EXOSQUELETTES D'ASSISTANCE DU DOS

Que ce soit pour supporter le buste en position fixe, ou pour assister son mouvement lors d'une flexion/extension, les exosquelettes d'assistance du dos (ED) ont pour objectif de réduire les contraintes de force appliquées sur les muscles érecteurs du rachis et extenseurs de la hanche. En pratique, ils sont principalement utilisés pour les

Figure 1 : Représentation d'exosquelettes passif souple (A) et actif (B) d'assistance du dos

tâches impliquant le maintien prolongé de postures contraignantes pour le dos ou pour les tâches de manutention manuelle de charges. Bien que tous conçus sur un objectif commun, ces exosquelettes se distinguent notamment par leur principe de fonctionnement.

Les exosquelettes dits passifs sont les plus couramment utilisés. Pour ces technologies, l'assistance physique est générée par la restitution d'énergie mécanique (ressorts, matériaux élastiques...). Il s'agit de dispositifs d'assistance physique (DAP). Certains de ces systèmes, dits rigides, utilisent des matériaux de faible densité tels que les plastiques, les composites en fibre de carbone ou certains métaux (aluminium, titane...). Leur rigidité permet une transmission d'efforts importante. La cinématique et les interfaces entre la structure et son porteur représentent de forts enjeux technologiques pour assurer un bon suivi des mouvements et un contrôle des efforts échangés. Ces systèmes possèdent généralement des appuis directs sur le buste et sur le haut des cuisses. Les points d'appui sont reliés à une liaison pivot au niveau de la hanche, axe au niveau duquel un couple d'assistance est généré. Pour certaines applications, un effort plus faible est suffisant pour fournir l'assistance nécessaire au porteur. Dans cette situation, l'usage d'une autre catégorie d'exosquelettes passifs peut être envisagé (figure 1A). Il s'agit d'exosquelettes dits souples, au regard de leur structure assemblée à partir de matériaux très flexibles qui se déforment en cours d'utilisation [4]. Les technologies employées sont très légères et épousent le corps du porteur. Pour une déformation d'amplitude donnée, les efforts transmissibles restent cependant faibles. Le plus souvent, ces systèmes sont conçus à partir de bretelles élastiques reliant le haut des mollets



© Deledda

aux épaules. Lorsque le porteur du système incline le buste vers l'avant pour saisir un objet au sol, les éléments élastiques se tendent, créant une force de redressement visant à limiter les efforts reposant en particulier sur la charnière lombo-sacrée. À l'inverse, pour d'autres exosquelettes, dits actifs, le principe de fonctionnement repose sur un système robotisé (couple commande-moteur) (figure 1B). Ces systèmes sont équipés d'actionneurs, le plus souvent électriques, générant un effort à partir d'une source d'énergie extérieure (figures 1 et 2). Il s'agit alors de robots d'assistance physique (RAP). Leur conception est généralement plus complexe et plus coûteuse, pour des systèmes finalement plus lourds que les modèles passifs. Une source d'énergie embarquée permet néanmoins de garantir la mobilité de l'opérateur dans son environnement, au détriment de la masse embarquée. De plus, les systèmes actifs offrent une bien meilleure polyvalence, les efforts générés étant commandés et ajustés en temps réel. Cette fonctionnalité permet aux exosquelettes robotisés de s'adapter aux variations de fréquence, d'amplitude, ou de vitesse des mouvements effectués par l'utilisateur.

Figure 2 : Représentation d'un exosquelette actif d'assistance corps entier



© Deledda

LES EXOSQUELETES D'ASSISTANCE DES MEMBRES SUPÉRIEURS

Les exosquelettes d'assistance des membres supérieurs (EMS) sont principalement destinés à être utilisés soit lors de tâches de manutention manuelle de charge, impliquant en particulier l'élévation, soit lors d'un maintien statique des bras en hauteur. La technologie, d'abord inspirée des systèmes *Steadycam* (de *steady-stable* : système pour stabiliser la caméra) utilisés dans le cinéma par les

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

Figure 3 : Représentation d'un exosquelette passif d'assistance des membres supérieurs



© Deledda

cameramen, est composée d'un ou deux bras fixés à une structure dorsale rigide (figure 3). Pour certains, la charge est directement fixée sur les bras de l'exosquelette et le porteur ne fait que positionner les effecteurs. Dans tous les cas, le principe de fonctionnement repose sur la compensation de gravité. Les bras du système sont précontraints mécaniquement. Des vérins ou des élastiques exercent, en retour, des efforts dans le mécanisme, résultant en une force verticale qui compense le poids de la charge manipulée. On retrouve cette technologie sur de très nombreux modèles conçus pour le port de charges, car elle permet de compenser une charge élevée en la redistribuant sur les hanches et les membres inférieurs. Selon leur conception, l'assistance est portée au niveau des bras, des avant-bras, ou des mains.

LES AUTRES EXOSQUELETES

D'autres types d'exosquelettes sont très récemment apparus sur le marché. Ceux-ci restent bien évidemment plus rares que les ED et les EMS, et leurs applications professionnelles restent par conséquent nettement moins répandues.

Il s'agit notamment des exosquelettes d'assistance à la préhension manuelle qui génèrent un couple assistant la fermeture des doigts de la main. À titre d'exemple, le système *Ironhand* [5] utilise un actionnement par câble, avec un principe de fonctionnement basé sur le mimétisme de l'anatomie humaine. Des tendons artificiels implantés dans un gant et pilotés par des actionneurs électriques permettent d'assister les doigts lors de la préhension.

Il s'agit également d'exosquelettes conçus dans l'optique d'assister leurs porteurs sur d'autres parties du corps. Certains équipements passifs proposent ainsi plusieurs assistances, par un assemblage de technologies d'assistances localisées (bras à compensation de charge, support de nuque ou assistance du dos). Enfin, d'autres exosquelettes actifs sont développés pour assister le corps entier. La structure robotisée permet de suivre simultanément les mouvements des membres supérieurs et inférieurs (figure 2).

Pour l'heure, les ED et les EMS sont les technologies d'assistance les plus répandues dans les entreprises. Ces systèmes font également l'objet de la grande majorité des études référencées sur le sujet [3, 6, 7]. L'objectif annoncé par leurs promoteurs est de lutter, respectivement contre le risque de lombalgies et de TMS des membres supérieurs.

APPORTS ET LIMITES DES EXOSQUELETES POUR LA PRÉVENTION DES TMS

Cette partie repose sur une analyse de la littérature, dont les principaux enjeux sont, d'une part, de recenser les preuves disponibles quant à l'ef-

ficacité prétendue de ces exosquelettes pour réduire les contraintes biomécaniques professionnelles et, d'autre part, de discuter des bénéfices réels en termes de prévention des TMS et des risques potentiels liés à l'usage de ces dispositifs.

INTÉRÊTS ET LIMITES DES EXOSQUELETES D'ASSISTANCE DU DOS POUR LA PRÉVENTION DES LOMBALGIES

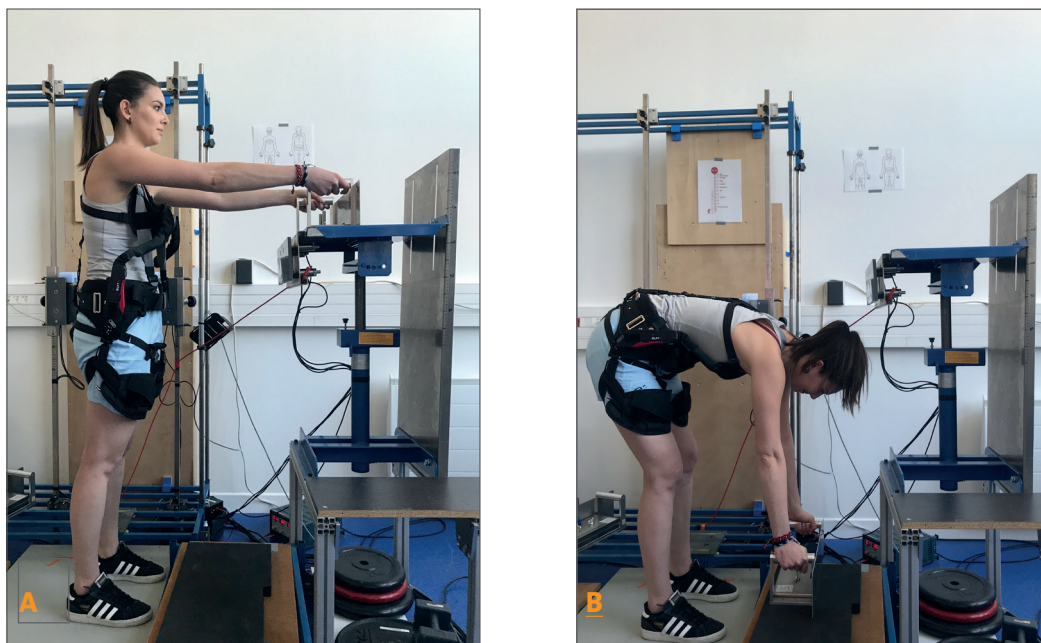
Les lombalgies font chaque année l'objet de près de 3 500 déclarations de maladies professionnelles et 170 000 accidents du travail [1], pour un coût annuel proche d'1 milliard d'euros. Dans la majorité des cas, les mécanismes à l'origine des douleurs lombaires sont complexes, car multifactoriels. Parmi les facteurs professionnels, les contraintes biomécaniques liées à l'activité restent les facteurs de risque prépondérants [2]. Par exemple, les efforts nécessitant des mouvements répétés en flexion ou en torsion du tronc, ainsi que les tâches en position maintenue, le tronc fléchi, sont connus pour leur implication dans l'occurrence des pathologies lombaires.

D'une manière générale, la littérature scientifique semble s'accorder sur l'efficacité des ED pour limiter les contraintes musculaires lombaires lors de tâches de maintenance, simulées en laboratoire, et strictement opérées dans le plan sagittal (flexion/extension du tronc vers l'avant) (figure 4). En particulier, les données expérimentales révèlent que les exosquelettes passifs permettent de réduire l'effort des muscles lombaires de 10 à 60 % en moyenne [3], lors des tâches dynamiques [9, 10], comme statiques [11, 12].

De même, il a été observé un bénéfice significatif lié à l'usage de ces dispositifs sur les douleurs lombaires ressenties par les opérateurs

Figure 4 : Exemple représentatif de tâches expérimentales mises en place à l'INRS pour l'étude d'exosquelettes d'assistance du dos (ED)

Dans cet exemple, les opérateurs, devaient effectuer une tâche de manutention manuelle de charge dans le plan sagittal, avec et sans ED. L'effet de l'ED était analysé pour différentes inclinaisons du buste au cours d'un cycle d'extension (A) /flexion (B) dans le plan sagittal [8]



© INRS

au cours de ce type de tâche [7], probablement lié à la réduction de l'activité des muscles lombaires.

Si l'usage d'un ED permet la réduction des efforts et des contraintes lombaires lors des tâches ponctuelles de manutention, ces systèmes pourraient également être à l'origine d'une réduction de la fatigue musculaire occasionnée par une activité de manutention prolongée. Plusieurs études tendent à confirmer cette hypothèse lors de tâches pouvant durer jusqu'à 1 heure [13 à 15]. Des travaux ont également démontré une augmentation significative (200 %) du temps d'endurance, sans douleur, grâce à l'utilisation d'un ED au cours d'une tâche de maintien postural du tronc incliné vers l'avant (40°) [11]. En revanche, il n'existe pour l'heure aucune étude ayant testé l'influence de ce type de dispositif sur la fatigue lombaire occasionnée par une tâche de travail plus longue. Des données quant à l'évo-

lution des capacités musculaires au cours de la journée, de la semaine, voire à moyen et long termes, pourraient également s'avérer pertinentes pour se rapprocher des conditions réelles d'usage en entreprise.

Par ailleurs, l'état des connaissances actuelles laisse également apparaître un certain nombre de réserves quant à l'usage d'ED à des fins de prévention des lombalgies. Par exemple, des analyses ont démontré que, lors des tâches de manutention en flexion du tronc, la baisse observée des contraintes exercées au niveau des lombaires grâce à l'usage d'un ED était en partie due à une diminution des mouvements de rotation (- 24 %) et de flexion latérale (- 30 %) du tronc [16]. L'impact possible de l'ED sur la mobilité du tronc pose donc la question de son influence sur les stratégies de mouvement et de travail dans des situations de manutention exigeant des mouvements

dans plusieurs plans. Des modifications significatives des stratégies cinématiques aux différents étages de la chaîne posturale (cheville, genou, hanche, rachis cervical...) ont en effet été observées avec l'usage d'ED [3].

Pour finir, ces observations soulèvent des interrogations quant à l'impact de ces changements sur l'équilibre statique et dynamique (locomotion notamment), sur les performances fonctionnelles [17] ou encore sur les potentielles compensations musculaires induites par l'usage d'ED sur l'ensemble de la chaîne posturale.

En définitive, les observations rapportées par les précédentes études tendent à confirmer l'intérêt des ED dans la réduction des contraintes musculaires au niveau du dos lors de tâches mobilisant spécifiquement le rachis en flexion/extension sagittale. Même si des questions persistent quant aux effets non-désirés liés à l'usage de ces

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

dispositifs, les premières observations s'avèrent rassurantes. Toutefois, l'analyse des données expérimentales suggère de porter une attention particulière aux caractéristiques de conception de ces dispositifs. Celles-ci pourraient avoir une influence importante sur l'amplitude des bénéfices en termes de réduction des contraintes biomécaniques dans la région lombaire, ainsi que sur les autres risques potentiels liés à l'usage d'ED (compensations musculaires antagonistes, modifications significatives des stratégies posturales...). Il paraît, en particulier, nécessaire d'optimiser l'adéquation entre le niveau d'assistance et son principe de fonctionnement (flexion de hanche vs courbure du rachis), d'une part, et les modalités de la tâche (charge manipulée, plage angulaire du mouvement) et les caractéristiques individuelles (anthropométriques et cinématiques), d'autre part. À défaut, l'utilisation de ce type d'exosquelette pourrait voir son intérêt limité ou même être responsable de nouvelles sollicitations musculaires [3].

INTÉRÊTS ET LIMITES DES EXOSQUELLETES D'ASSISTANCE DES MEMBRES SUPÉRIEURS POUR LA PRÉVENTION DES TMS DE L'ÉPAULE

En France, environ 90 % des TMS déclarés en tant que maladies professionnelles concernent les membres supérieurs [1]. Parmi eux, près de 40 % impliquent l'épaule, qui est le siège de pathologies récurrentes, parmi les plus sévères. Si la survenue de TMS de l'épaule peut être liée à des facteurs de risque multiples, elle est souvent associée aux contraintes professionnelles. Sur le plan biomécanique, la survenue des tendinopathies de l'épaule serait notamment occasionnée par

les contraintes dynamiques, associant les sollicitations de l'épaule en flexion et en abduction, les situations de travail avec les mains au-dessus du plan des épaules et la manutention de charges lourdes. Plusieurs modèles d'EMS commerciaux ont été conçus dès 2015 pour réduire les efforts des muscles de l'épaule lors de tâches de manutention manuelle de charge ou lors de tâches impliquant le maintien prolongé des bras en hauteur. De par leur conception, décrite dans la partie précédente, le principal effet attendu de l'usage de ces systèmes est de réduire les efforts musculaires associés à l'élévation des bras dans les différents plans d'action (sagittal, frontal et scapulaire).

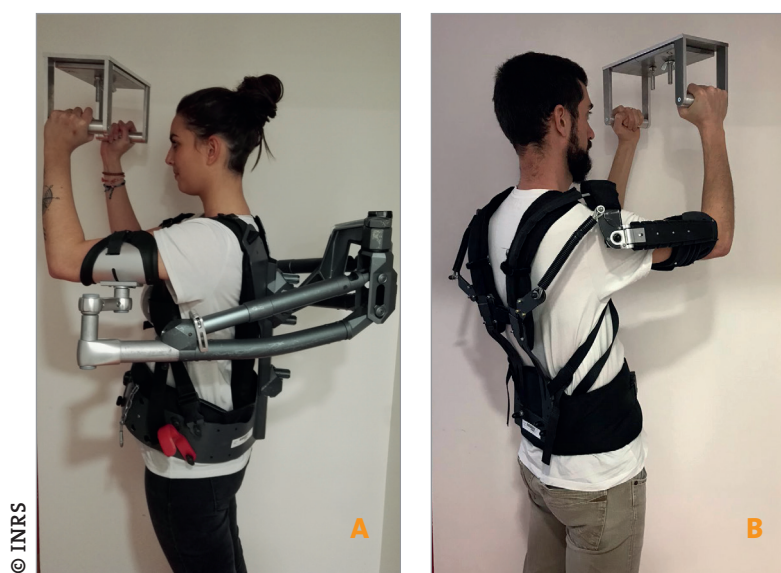
Sur la base des recherches actuellement disponibles, il existe des preuves suffisantes concernant l'efficacité des EMS pour réduire l'activité des muscles fléchisseurs de l'épaule (deltoïdes moyen et antérieur), en particulier lors de tâches impliquant la manipulation d'une charge en hauteur [18, 19]. Dans ces conditions, l'usage des EMS se traduit également par une diminution de l'inconfort perçu par les utilisateurs au niveau des épaules [7, 19]. Ces résultats arguent en faveur de l'intérêt de ce type de dispositif dans la prévention des TMS de l'épaule. En effet, les contraintes exercées par les muscles fléchisseurs de l'épaule, ainsi que l'intensité de l'effort perçu localement, sont connues pour leur implication dans le développement des douleurs, des troubles articulaires et des lésions tendineuses, en particulier de la coiffe des rotateurs qui contribue entre autres à la stabilisation de l'articulation scapulo-humérale lors de l'élévation des bras. Une première limite à ces conclusions provient du fait que la majorité des études ayant évalué les bénéfices de l'usage d'un EMS sur

la réduction des contraintes biomécaniques associées au travail a focalisé son attention sur les activités nécessitant une élévation des bras au-dessus de la tête [20, 21] (figure 5). Les preuves permettant de soutenir l'efficacité de ces technologies dans la réduction de l'activité des muscles de l'épaule, de manière plus générale, lors de tâches de manutention manuelle apparaissent nettement plus rares [7].

Une seconde limite, non négligeable, est inhérente au fait que la seule réduction des efforts générés par les muscles de l'épaule impliqués dans l'élévation du bras ne suffit pas à démontrer que les structures musculo-squelettiques seront préservées par l'usage d'un exosquelette. Le maintien des coordinations musculaires ainsi que du comportement biomécanique de l'articulation sont des éléments indispensables à prendre en compte. Or, à ce jour, les informations disponibles quant à l'impact d'une assistance du membre supérieur sur le comportement fonctionnel des articulations de l'épaule semblent quasi inexistantes. D'autres études apparaissent nécessaires afin d'investiguer cette question. À ce jour, seule une étude récente de l'INRS a testé l'hypothèse selon laquelle l'usage d'un système d'assistance mécanique au mouvement de l'épaule pourrait avoir des conséquences sur le schéma moteur de l'action et, de surcroît, sur le comportement fonctionnel de l'articulation. Ces recherches ont mis en évidence que le recours à une assistance physique lors d'une flexion de l'épaule inférieure à 90° pourrait limiter les contraintes musculaires sans accroître les contraintes mécaniques à l'origine des tendinopathies liées au conflit sous-acromial. Cette étude suggère néanmoins que ces premières conclusions ne sont pas transférables pour une

Figure 5 : exemple représentatif de tâches expérimentales mises en place pour l'évaluation des effets d'exosquelette

Ici avec les modèles EXHAUSS Stronger® (EXHAUSS®, France, A) et SKEL-EX® V1 (SKEL-EX, Netherlands, B) sur l'activité des muscles mobilisant les membres supérieurs [22]



élévation des bras supérieure à 90° de flexion de l'épaule. Par conséquent, si ces résultats peuvent apparaître comme une démonstration en faveur de l'utilisation d'EMS à des fins de réduction des risques de TMS de l'épaule, ils doivent également alerter les utilisateurs de ces technologies sur le risque potentiel lors des tâches impliquant une élévation importante des bras. Le respect des cycles efforts/repos, de la durée de travail et du poids des charges à manutentionner qui s'impose en situation habituelle de travail doit être similaire lors du recours aux EMS.

Une dernière limite importante est en lien avec les conséquences potentielles que l'usage d'un EMS pourrait avoir sur l'activité des muscles posturaux, en particulier au niveau de la charnière lombaire. Les observations rapportées par l'ensemble des études portant sur l'impact des EMS sur l'activité

des muscles érecteurs spinaux lors d'activités de manutention manuelle ne montrent pas de consensus [7]. Certaines n'ont rapporté aucun impact de l'usage d'un EMS sur l'activité de ces muscles [23, 24] alors que d'autres ont conclu à une diminution de l'activité musculaire avec l'équipement [25] ou au contraire, à une augmentation des contraintes musculaires au niveau du dos [26]. Plus largement, l'usage de ces technologies pourrait également avoir des répercussions sur le contrôle postural, de la genèse de l'action (inertie, force, vitesse, trajectoire) à la régulation de l'équilibre (masse supplémentaire et déplacement du centre de masse). Les études sur ce sujet restent très rares. Seule une étude récente de l'INRS a évalué l'impact de l'usage d'un EMS sur les mécanismes d'adaptation posturale pour une tâche mobilisant les membres supérieurs dans le plan sagittal lors

d'un mouvement rapide d'extension. Il était supposé que les changements inertiels du mouvement liés à l'usage d'un EMS, ainsi que les perturbations proprioceptives induites, pouvaient entraîner une modification significative des régulations posturales, affectant ainsi les performances motrices et le contrôle de l'équilibre. Dans le cas présent, l'usage de l'EMS s'est en effet accompagné d'une augmentation des oscillations posturales au cours du mouvement. De plus, les participants n'ont pas été en mesure de maintenir un niveau de performance similaire avec EMS et sans, ce qui a probablement permis de ne pas exacerber les réponses musculaires de la chaîne posturale. Les conclusions de cette étude démontrent ainsi que, même après une période de familiarisation conséquente à l'usage de l'EMS, le port de ce dispositif lors d'un mouvement dynamique des bras peut occasionner des perturbations légères des mécanismes neuromusculaires de régulation de l'équilibre. Une attention particulière doit donc être portée aux conditions de réalisation de la tâche pour laquelle l'usage de cette technologie est envisagé.

En outre, comme pour les ED, il semble que les avantages et inconvénients potentiels de l'usage d'EMS dépendent d'une forte interaction entre les conditions spécifiques de réalisation de la tâche et les caractéristiques de conception de l'exosquelette [22]. Plus généralement, au-delà des performances d'assistance du dispositif, il semble que, si l'on considère en particulier la conception des EMS, les problèmes d'ajustement, de confort et d'utilisation sont des caractéristiques importantes à optimiser afin de maximiser la satisfaction des utilisateurs et l'adoption du dispositif [7].

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

CONSÉQUENCES PRATIQUES POUR LA PRÉVENTION DES TMS

L'état actuel des connaissances ne permet donc pas de conclure, sans réserve, à l'efficacité des exosquelettes industriels pour prévenir la survenue de TMS, en raison notamment des observations faites quant aux effets indésirables liés à l'usage d'exosquelette (nouvelles contraintes posturales, inconfort, diminution des performances fonctionnelles). Il convient cependant de reconnaître le potentiel réel de ce type de technologies pour limiter l'exposition des opérateurs aux contraintes biomécaniques locales associées à certaines de leurs tâches professionnelles.

Sur la base des preuves disponibles dans la littérature, il semble en effet que les exosquelettes soient particulièrement efficaces dans le cadre de tâches spécifiques (élévation du bras, extension sagittale du tronc), pour lesquelles leur usage était préalablement dévolu (mouvement, position et groupe musculaire à soulager) [3]. L'amplitude des bénéfices observés avec l'usage de ces technologies lors des précédentes études, en termes de réduction des sollicitations musculaires, apparaît extrêmement variable (de - 10 à - 80 %). Ceux-ci seraient directement dépendants de l'interaction entre les besoins d'assistance physique associés à la tâche, les caractéristiques de conception, les performances d'assistance de l'exosquelette et les caractéristiques individuelles des porteurs. En l'absence de réponse générique quant à l'efficacité de ces nouvelles technologies comme solution de prévention des TMS, il est donc nécessaire de s'assurer que l'exosquelette soit adapté à l'opérateur et aux spécificités de la tâche pour laquelle il est envisagé.

En pratique, l'usage d'un exosquelette paraît ainsi plus particulièrement adapté aux tâches standardisées et répétées. Des exemples d'intégrations réussies, ayant conduit à un usage à long terme d'un exosquelette en situation de travail, ont notamment été identifiées lors de tâches de ponçage de plafond impliquant une élévation prolongée des membres supérieurs. Dans ce cas, il existait une forte adéquation entre les performances de l'exosquelette d'assistance des membres supérieurs utilisés et la nature des contraintes physiques liées à la tâche. L'usage de ce dispositif a alors permis de diminuer efficacement les efforts musculaires et la fatigue ressentie par les opérateurs [27].

Dans d'autres cas, l'activité de travail peut être diversifiée et comporter de nombreuses tâches de nature différente. Les besoins en assistance physique relatifs à chaque tâche peuvent alors être compatibles, ou non, avec les performances d'assistance de l'exosquelette. L'intégration de cette technologie est dans ce cas plus délicate. Des retours d'expérience quant à l'intégration d'un exosquelette robotisé destiné à l'activité des tireurs de râteau ont notamment démontré que l'usage de ce dispositif pouvait transformer l'activité réalisée par l'opérateur équipé, mais aussi celle du collectif de travail [27]. Plus largement, ces observations de terrain ont mis en évidence la nécessité de mener une réflexion plus globale sur l'organisation du travail afin d'exploiter au mieux le potentiel d'assistance physique de l'exosquelette.

Une compréhension fine de l'activité semble alors indispensable afin de définir les séquences de travail pour lesquelles les bénéfices potentiels de l'exosquelettes sont avérés, et de s'assurer que son usage

ne dégrade pas les conditions de travail pour le reste de l'activité. À condition d'avoir épuisé, en amont, les pistes de prévention collectives visant à adapter l'environnement de travail pour préserver les salariés des risques professionnels, l'entreprise peut donc envisager l'exosquelette comme une solution à intégrer dans sa démarche globale de prévention des TMS. Les entreprises alors désireuses de s'équiper d'exosquelette doivent s'appuyer sur une démarche d'intégration structurée.

AUTRES RISQUES ET POINTS DE VIGILANCE

Au-delà de son influence sur les facteurs de risques de survenue des TMS, l'usage d'un exosquelette professionnel en situation réelle de travail soulève de nombreuses autres questions en matière de santé et de sécurité. Plusieurs risques professionnels ont notamment été identifiés à partir d'observations de terrain et des connaissances acquises. Ceux-ci doivent faire l'objet d'une évaluation lors de l'analyse des risques professionnels générés par les exosquelettes (figure 6).

Par exemple, des risques **liés à la charge physique, autres que ceux directement associés à la survenue des TMS**, doivent faire l'objet d'une vigilance spécifique. Une étude récente a en particulier démontré que le poids des exosquelettes et la gêne associée à la réalisation de certains mouvements pouvaient conduire à une augmentation des sollicitations biomécaniques et de l'appareil cardio-vasculaire lors de tâches de manutention de charges [24].

Par ailleurs, comme la plupart des équipements de travail, les exosquelettes présentent, à cause de leur encombrement ou de leur structure, des risques de collision

Figure 6 : Infographie illustrant les principaux points de vigilance en matière santé et sécurité relatifs à l'usage d'exosquelettes professionnels

Exosquelettes au travail : 6 points de vigilance

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



Pour en savoir plus : www.inrs.fr/exosquelettes

avec une tierce personne ou des éléments de l'environnement. Les frottements ou les pressions répétées de la structure de l'exosquelette sur certaines parties du corps peuvent, quant à eux, être à l'origine d'inconfort et d'irritations de la peau, voire de lésions plus profondes (compression d'un muscle ou d'un nerf par exemple). Dans le cas d'une utilisation ou d'un réglage inadaptés de l'exosquelette, celui-ci pourrait également générer un risque de coincement, voire d'écrasement d'une partie du corps de l'opérateur entre les éléments mobiles du système.

Enfin, certaines activités réalisées à l'aide d'exosquelettes exigent une attention accrue liée à une modification des modes opératoires et des stratégies des opérateurs qui peut s'accompagner d'une augmentation du stress. De plus, lorsque l'organisation du travail place le salarié sous la dépendance des exosquelettes, elle peut renforcer le sentiment de perte de contrôle sur son

travail et d'autonomie dans son activité, et ainsi également contribuer à l'émergence de risques psychosociaux.

REPÈRES MÉTHODOLOGIQUES POUR L'INTÉGRATION D'UN EXOSQUELETTE EN ENTREPRISE

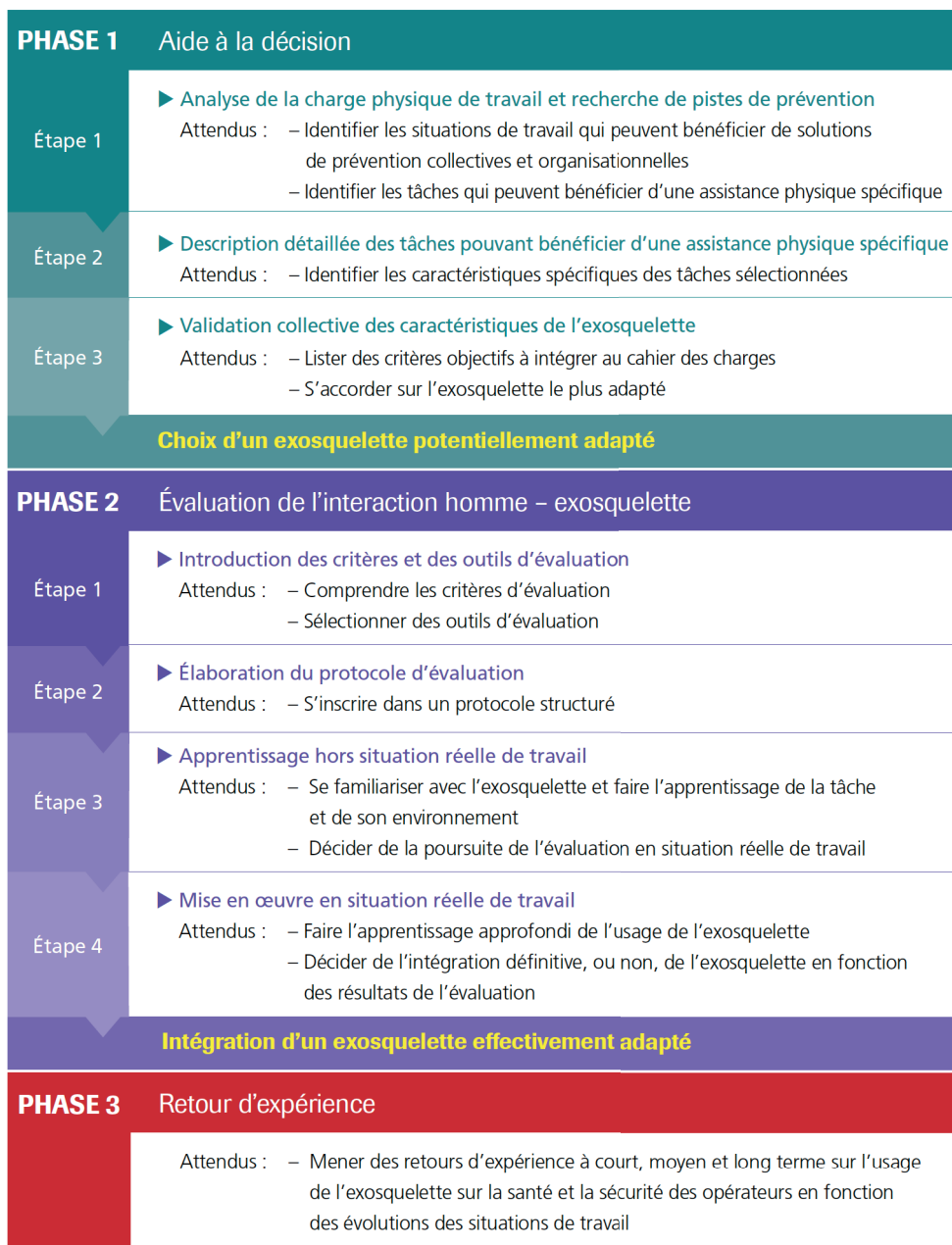
L'objectif de cette partie est de présenter les principaux repères méthodologiques nécessaires à la mise en place d'une démarche d'intégration d'exosquelette. L'idée est de créer, au sein de l'entreprise, les conditions permettant l'évaluation des usages de l'exosquelette dans la situation de travail et le suivi de son intégration au cours du temps. Des travaux récents menés par l'INRS ont conduit à proposer une démarche structurée d'intégration d'un exosquelette en trois phases (*figure 7 page suivante*) [28].

PHASE 1 : AIDE À LA DÉCISION

Les actions menées lors de la première phase ont pour objectif de s'assurer que l'exosquelette est bien la réponse appropriée à la problématique identifiée dans l'entreprise (plaintes exprimées par les opérateurs, problèmes de TMS, maintien dans l'emploi d'un salarié). Cette phase implique une analyse fine de l'activité des salariés concernés. Elle permettra notamment de faire le lien entre les facteurs de risques de TMS et les déterminants de l'activité sur lesquels agir pour transformer la situation de travail. L'analyse de l'activité, qui permet notamment d'identifier les tâches nécessitant une assistance physique spécifique, devra être complétée par une caractérisation précise du besoin de l'entreprise en matière d'assistance physique, en tenant compte des spécificités de la tâche et des contraintes physiques localisées qu'elle génère, des caractéristiques des futurs utilisateurs et du contexte organisationnel.

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

Figure 7 : Schéma de la démarche générale d'acquisition et d'intégration d'un exosquelette



des usages attendus, mais aussi des exigences en matière de santé et de sécurité des futurs utilisateurs. En fonction des conclusions de cette étape, il pourra être envisagé de s'orienter vers le choix d'un dispositif disponible sur le marché ou vers la conception d'un dispositif sur mesure.

La démarche de consultation des fournisseurs ou des concepteurs d'exosquelettes peut s'avérer difficile pour l'entreprise. En effet, la multiplication des acteurs et la diversité croissante des modèles d'exosquelette disponibles sur le marché peuvent rendre nécessaire une pré-sélection d'exosquelettes répondant potentiellement aux besoins d'assistance physique préalablement identifiés [29].

PHASE 2 : ÉVALUATION DE L'INTERACTION HOMME-EXOSQUELETTE

La seconde phase débute à partir du moment où l'entreprise a été en mesure de qualifier un ou plusieurs modèles d'exosquelette comme pouvant répondre aux besoins d'assistance physique identifiés. Il s'agit alors de s'engager dans un protocole d'évaluation s'appuyant sur quelques salariés volontaires. Cette phase de tests permet de procéder à toutes les étapes d'évaluation nécessaires à l'identification des apports et des limites que pourrait générer l'intégration de l'exosquelette dans la situation de travail.

Il est nécessaire de vérifier auprès des concepteurs, des fournisseurs ou des intégrateurs que leurs produits sont en mesure de répondre au principal besoin d'assistance physique préalablement défini, puis d'évaluer les bénéfices apportés par l'exosquelette en situation réelle de travail, après une période de familiarisation des opérateurs à l'usage de l'exosquelette [28]. De la même façon, il est nécessaire d'évaluer

Cette étape exige de s'appuyer sur l'expérience qu'ont les salariés de leurs propres situations de travail et des contraintes associées. Les efforts musculaires, les postures habituellement adoptées et les sollicitations en termes de charge physique globale et locale doivent être plus particulièrement étudiés et questionnés.

Le projet d'intégration d'un exosquelette dans l'entreprise peut s'arrêter dès cette 1^{re} étape, en

fonction des résultats de l'analyse des besoins d'assistance physique et des autres solutions de transformation pouvant répondre efficacement à sa problématique. En revanche, si les pistes de prévention semblent épuisées, et que le recours aux exosquelettes apparaît comme une voie de transformation possible, il est alors nécessaire d'élaborer un cahier des charges intégrant les exigences techniques du futur exosquelette en fonction

les effets autres que ceux attendus initialement. Ces derniers peuvent se révéler bénéfiques en termes de prévention des TMS ou au contraire délétères. En effet, même lorsque la catégorie d'exosquelettes semble adaptée aux caractéristiques de la tâche réalisée, il est possible d'observer un transfert des efforts, d'intensité variable, du ou des muscle(s) assisté(s) vers d'autres muscles ainsi que des perturbations de l'équilibre. Comme évoqué dans les premières parties de ce document, l'amplitude des bénéfices et des limites s'avère directement dépendante des conditions de réalisation de la tâche. Elle varie notamment selon le caractère statique ou dynamique de la tâche, l'axe du mouvement, le degré d'inclinaison du tronc ou encore le poids de la charge manutentionnée. Divers outils d'évaluation sont disponibles pour mesurer le niveau de sollicitation des groupes musculaires censés être assistés et pour interroger la perception de l'utilisateur. Ils doivent être complétés par d'autres critères d'évaluation portant sur la manière dont l'opérateur s'approprie l'équipement, mais aussi l'utilité de l'assistance physique proposée pour réaliser la tâche demandée, la facilité d'emploi du système proposé, l'impact de l'exosquelette sur les stratégies opératoires et le collectif de travail ou encore les risques pour la sécurité de l'opérateur et de son environnement. La mise en balance des bénéfices apportés par l'exosquelette et des contraintes et risques potentiels constituera le principal élément d'aide à la décision quant à la poursuite ou non de la démarche d'intégration de l'exosquelette initialement envisagé.

Finalement, s'il est décidé de poursuivre l'intégration de l'exosquelette malgré la présence potentielle d'autres effets, même mineurs, ceux-ci doivent être communiqués

aux futurs utilisateurs et faire l'objet d'une vigilance accrue dans le cadre du suivi.

PHASE 3 : RETOUR D'EXPÉRIENCE ET SUIVI

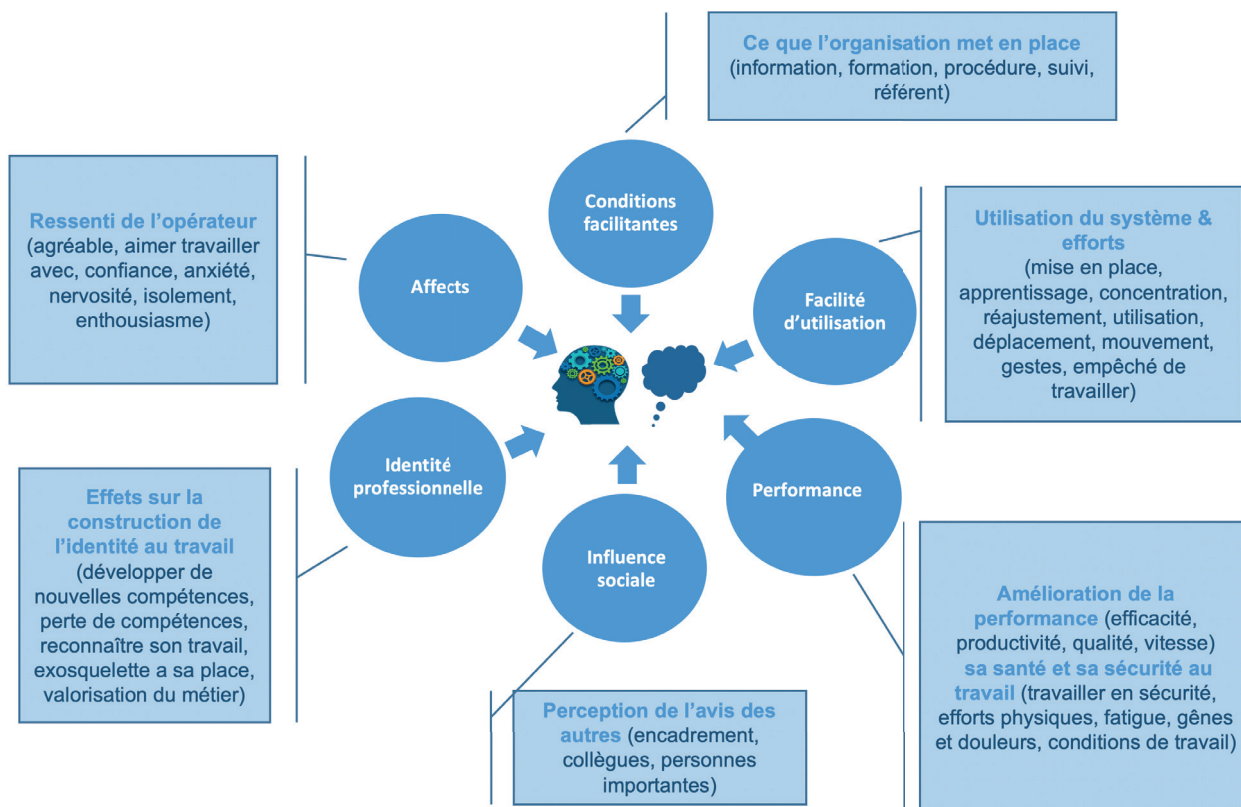
Le recueil des retours d'expériences constitue la troisième et dernière phase de la démarche. Il s'agit d'organiser et de documenter un suivi de l'usage de l'exosquelette en situation de travail, en menant des évaluations itératives, à court, moyen et long termes. L'enjeu est de remettre régulièrement en question les apports du système en fonction des évolutions de la situation de travail.

Sur un plan méthodologique, les évaluations menées au cours du suivi doivent s'appuyer sur différents indicateurs liés aux salariés (santé, plaintes, satisfactions, par exemple), à la structure (tels que les accidents du travail, l'absentéisme, le *turn-over*) et à l'activité (changements techniques, humains, organisationnels). En effet, l'introduction d'exosquelettes, comme toute nouvelle technologie, constitue un changement important, que ce soit au niveau de l'organisation des tâches, de l'activité des opérateurs ou encore de leurs modes opératoires. Une fois mis à disposition dans l'entreprise, l'exosquelette peut alors faire l'objet d'un rejet par les utilisateurs, être, à l'inverse, accepté, ou encore accepté dans un premier temps pour être finalement rejeté. Les raisons sous-jacentes à ces différentes situations renvoient à des questions regroupées sous la terminologie d'acceptation. Dans un certain nombre de cas, les entreprises se trouvent dépourvues face au rejet des dispositifs d'assistance par les utilisateurs, tant au niveau de la compréhension de ce phénomène que pour l'élaboration de solutions afin d'y répondre. Pour identifier les points

bloquants, il est possible de questionner six dimensions, reprenant, entre autres, des éléments proposés par la Théorie Unifiée d'Acceptation et d'Usage des Technologies [30]. Ces six dimensions sont les suivantes : les conditions facilitantes (relatives à ce que l'organisation met en place dans le cadre de l'intégration des exosquelettes tant en amont de leur déploiement qu'une fois déployés), la facilité d'utilisation ou utilisabilité (degré selon lequel un opérateur ressent que l'utilisation du système ne nécessite pas d'effort), les attentes de performance (ou utilité perçue) qui sont divisées en deux parties : performance du point de vue de la production et du point de vue de la santé et sécurité, l'influence sociale (direction, encadrement et collègues), les aspects professionnels et identitaires, et enfin les affects ([figure 8 page suivante](#)) [32]. Trouver le bon équilibre entre ces différentes dimensions conduit à l'acceptation. Cet équilibre n'est pas aisé à définir, d'autant plus que les processus d'acceptation sont complexes, fragiles et dynamiques dans le sens où ils peuvent évoluer. Ainsi, une modification du dispositif, même minime, peut avoir des répercussions sur une des dimensions de l'acceptation et, selon que ses effets sont positifs ou négatifs, peut conduire à une modification de l'acceptation dans un sens ou dans un autre. Il est crucial d'en tenir compte car en termes de risques, le déploiement d'une nouvelle technologie non acceptée, mais qui serait imposée, peut générer des facteurs de risques psychosociaux, physiques voire être accidentogène. Ainsi, un exosquelette non adapté à la tâche, voire aux modes opératoires, peut être à l'origine d'autres facteurs de risques physiques (par exemple des sollicitations supplémentaires

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

Figure 8 : Synthèse des différentes dimensions impliquées dans l'acceptation des exosquelettes [31]



d'autres parties du corps). La question de l'acceptation fait partie intégrante de la problématique des exosquelettes [33] et doit ainsi rester au centre des préoccupations des entreprises, des préventeurs et des SST au cours du suivi de l'intégration. Sur un plan opérationnel, les retours d'expériences recueillis en situation de production lors de ce suivi permettront un arbitrage visant à décider du maintien, voire du déploiement plus large de ces technologies dans l'entreprise, ou, à l'inverse, de la modification voire de l'abandon de l'usage d'exosquelettes pour la ou les situations de travail définies initialement. Cette décision sera fondée sur les retours d'expériences collectés au cours d'un suivi d'une durée suffisante. Ceux-ci auront en effet permis une analyse critique des moyens mis en œuvre, des résultats obtenus et de l'impact en matière de prévention. La décision finale reposera majoritairement

sur l'équilibre entre les bénéfices en termes de réduction des contraintes musculaires et articulaires et les limites de l'usage de l'exosquelette identifiées lors de l'analyse des risques : dégradation des conditions de travail (tels les risques pour la sécurité, gênes, douleurs, fatigue, charge mentale), perturbations gênant l'atteinte des objectifs de travail (efficacité, productivité, qualité, vitesse).

PERSPECTIVES SUITE À L'INTÉGRATION DE L'EXOSQUELETTE

À l'issue d'une procédure d'intégration validée par l'entreprise, celle-ci peut décider de déployer la démarche menée au niveau de la situation « pilote » initiale, au profit d'autres situations de travail nécessitant une assistance physique, ou pour des situations de travail similaires sur des sites différents, ou encore avec des collectifs différents. Il s'agit de la phase de déploiement.

L'entreprise s'appuiera alors sur la capitalisation des retours d'expérience opérés lors du suivi (développement de nouveaux usages, réorganisation des collectifs et du travail, évolution des indicateurs santé/sécurité...). Néanmoins, le déploiement d'exosquelettes à plus grande échelle doit être organisé avec la même rigueur que les phases qui jalonnent l'intégration initiale de l'exosquelette [28]. L'ensemble des critères d'évaluation déjà éprouvés dans l'entreprise devront alors être à nouveau mobilisés. Il sera également nécessaire de rester vigilant à maintenir la dynamique pluridisciplinaire mise en œuvre dans la démarche initiale.

RÔLE DES SERVICES DE SANTÉ AU TRAVAIL

Comme évoqué précédemment, l'intégration d'exosquelettes au

sein d'une entreprise nécessite une préparation importante. Les différentes phases de cette démarche impliquent l'engagement de nombreux acteurs de l'entreprise. À ce titre, les SST doivent être sollicités par les entreprises souhaitant faire l'acquisition d'un exosquelette. Les médecins du travail (MT) et infirmiers diplômés d'État en santé au travail (IDEST) ainsi que les autres préventeurs des SST (ergonomes, psychologues, intervenants en prévention des risques professionnels-IPRP, assistants de service de santé au travail-ASST) sont en effet directement concernés par la question de l'intégration d'un exosquelette dans l'entreprise, car ces dispositifs pourraient avoir un impact sur la santé et la sécurité des salariés, dans un sens aussi bien positif que négatif. En fonction du moment et des circonstances dans lesquelles ceux-ci sont sollicités par l'entreprise, ils peuvent être amenés à agir aux différentes étapes de la démarche d'intégration d'exosquelettes (*figure 7 p. 26*) en lien avec d'autres acteurs concernés ou compétents (Caisse d'assurance retraite et de la santé au travail-CARSAT, Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France-CRAMIF, Caisse générale de sécurité sociale-CGSS, Organisme professionnel de prévention du Bâtiment et des travaux publics-OPPBT, fédérations professionnelles, cabinets conseil, par exemple). L'INRS a récemment mené une enquête de terrain auprès des MT et IDEST dont l'objectif principal était de préciser leur rôle potentiel dans l'intégration de ces nouvelles technologies dans l'entreprise [34]. Sur la base de cette étude, cette partie a pour objectif d'apporter des repères opérationnels quant au rôle des SST lors d'une démarche d'acquisition et d'intégration d'un exosquelette.

AIDE À LA DÉCISION

Lors de cette première phase du projet, les SST auront principalement un rôle de conseil. Ceci implique qu'ils se soient préalablement forgé un avis concernant ces technologies d'assistance physique. Ils doivent, par exemple, être en mesure d'informer les entreprises sur les intérêts et les limites des exosquelettes en matière de prévention des TMS en s'appuyant sur une documentation déjà bien étayée.

Sur le plan collectif, ils sauront alors informer les dirigeants de l'entreprise sur les bénéfices à attendre de ces technologies en matière de prévention des TMS, mais également sur leurs potentiels effets indésirables (déplacement des contraintes musculaires, altération du contrôle du mouvement, gênes fonctionnelles, augmentation des contraintes cardiovasculaires...) et les autres risques précédemment décrits (écrasement/collision, charge mentale, inconfort et irritation des zones en contact avec l'exosquelette...). La mise en perspective de ces effets et risques par rapport à la situation de travail pour laquelle un exosquelette est envisagé permettra aux SST de formuler des précautions d'emploi adaptées. Les professionnels des SST pourront s'appuyer sur le guide « *10 idées reçues sur les exosquelettes* » [35] pour initier les premiers échanges avec l'entreprise sur le sujet. En matière de ressources documentaires, d'autres articles ou revues antérieures peuvent compléter l'usage de ce document [3, 36].

Sur un plan individuel, les MT seront également en mesure de se prononcer sur l'absence de contre-indication médicale au port de l'exosquelette ou, au contraire, de déconseiller l'équipement d'un salarié si l'exosquelette est susceptible de nuire à sa propre santé. En effet, en tant que

professionnels de santé, ils sont les seuls, avec les IDEST, à connaître et à suivre l'état de santé des salariés dans le milieu de travail. Sur la base de leur connaissance des risques associés à l'usage d'un type d'exosquelette défini, ils auront alors la possibilité d'évaluer, individuellement, la pertinence d'un projet en cours, en fonction de leur analyse de la balance bénéfique/risque associée à l'usage de cette technologie dans le contexte spécifique des tâches de travail exercées par l'opérateur.

D'une manière plus générale, les SST sont en mesure d'aider l'entreprise à identifier et analyser avec précision les tâches concernées par des problématiques de TMS et à statuer sur le fait que l'exosquelette apparaisse ou non comme une solution potentielle pour les prévenir, en participant aux groupes de travail et discussions avec les différentes parties prenantes. Le MT, l'IDEST ou d'autres membres du SST peuvent, par exemple, accompagner l'entreprise dans son analyse du besoin d'assistance physique avant de s'interroger collectivement sur la solution exosquelette, parmi d'autres solutions susceptibles de transformer la situation de travail. Ils peuvent ainsi aider l'entreprise à formaliser un cahier des charges traduisant en critères techniques les résultats de l'analyse préalable afin de caractériser les fonctions de l'assistance attendue.

ÉVALUATION DE L'INTERACTION HOMME-EXOSQUELETTE

Le MT, l'IDEST et les autres préventeurs du service de santé au travail ont également un rôle clé à jouer dans l'évaluation de l'usage de l'exosquelette (*figure 7 p. 26*). Ils apportent leurs connaissances des méthodes et outils permettant d'investiguer le ressenti (efforts,

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

gènes...), de caractériser les conséquences physiologiques (activité musculaire, sollicitations cardiovasculaires...) liées à l'usage d'un exosquelette et d'identifier les bénéfices et limites en matière de prévention. Ils peuvent également accompagner l'entreprise dans l'évaluation de l'acceptabilité puis de l'acceptation de ces technologies [32], afin de s'assurer que celle-ci est en mesure de mettre en place des conditions favorables à l'intégration des exosquelettes et à l'adhésion des opérateurs. Sur la base des données recueillies et de leur interprétation, ils peuvent contribuer à une prise de décision concernant la poursuite ou la réorientation du projet, le cas échéant, vers d'autres pistes de prévention. À l'instar de la phase précédente d'analyse du besoin, les services de santé peuvent être amenés à dimensionner différemment leurs interventions en fonction de l'organisation initiale et de la mise en œuvre du projet.

SUIVI ET RETOURS D'EXPÉRIENCE

Enfin, les professionnels des SST ont une place privilégiée dans le suivi des salariés équipés. Il est alors pertinent de mettre en place un suivi s'appuyant sur un protocole de visites régulières, à discuter avec l'entreprise. Celui-ci devrait idéalement débiter dès la mise en œuvre de la démarche et se poursuivre au-delà de la phase de déploiement. Lors de ces visites d'information et de prévention (VIP) supplémentaires, les MT et IDEST seront à même de constater les effets, aussi bien positifs que négatifs, de l'usage des exosquelettes sur la santé des opérateurs. Sur un plan opérationnel, ils devront aborder avec les utilisateurs les difficultés de nature variée résultant

de l'usage de l'exosquelette, notamment en utilisant les outils d'évaluation précédemment mobilisés lors de la démarche d'évaluation. Premièrement, les questionnaires de ressenti pourront être utilisés pour suivre l'évolution de l'intensité des douleurs et des gênes, ainsi que de leur localisation. Les questionnaires d'évaluation des différentes dimensions de l'acceptation donneront une visibilité plus large sur l'adhésion de l'opérateur à l'usage de son exosquelette et permettront de prévenir tout risque en lien avec un éventuel rejet de la technologie. De par son positionnement, le SST pourrait être en mesure d'identifier les retentissements psychologiques liés à un manque d'adhésion au changement ou d'acceptation de la technologie que les décideurs de l'entreprise pourraient avoir des difficultés à percevoir. Ces VIP doivent également permettre aux professionnels des SST d'aborder l'ensemble des points de vigilance liés aux risques professionnels associés à l'usage des exosquelettes (*figure 6 p. 25*). Pour finir, les opérateurs doivent être entendus sur les nouvelles intentions d'usage de l'exosquelette qui pourraient être occasionnées par des changements organisationnels, ou de stratégie des opérateurs. Le cas échéant, les SST pourraient être amenés à préconiser à l'entreprise de réitérer les évaluations de l'interaction Homme-exosquelette pour s'assurer que les bénéfices attendus soient préservés et qu'aucun nouvel effet – non désiré – ne soit la conséquence de cette modification d'usage. En complément de la surveillance de la santé au travail individuelle, ce suivi spécifique à l'usage de l'exosquelette par les SST paraît crucial pour nourrir la réflexion avant tout déploiement de la démarche vers d'autres situations de travail.

CONCLUSION

Depuis 2010, on assiste à une forte croissance du nombre d'études à l'échelle mondiale cherchant à établir les preuves concrètes quant aux avantages et aux risques liés à l'utilisation des exosquelettes pour la prévention des TMS. Depuis peu, ces travaux abordent également les dimensions cognitives, psychosociales et organisationnelle liées à l'usage de ces technologies en milieu professionnel. Des études futures restent néanmoins attendues pour combler les principales lacunes demeurant dans les connaissances actuelles, en examinant, par exemple, l'impact des exosquelettes sur les coordinations musculaires, la survenue de la fatigue, ou encore les adaptations physiologiques à long terme.

Pour l'heure, si la communauté scientifique tend vers un consensus quant au potentiel d'atténuation des efforts musculaires offert par les exosquelettes, leur caractère protéiforme associé à l'hétérogénéité des protocoles d'évaluation mis en place compliquent grandement la construction d'informations génériques à destination des entreprises quant aux bénéfices à attendre de ces technologies à des fins de prévention des TMS, et quant aux risques qu'elles peuvent occasionner en termes de santé et sécurité pour les opérateurs.

Les principes méthodologiques décrits dans cet article permettent aux préventeurs et à l'entreprise d'appréhender de nombreuses questions posées par l'intégration d'un exosquelette. Le caractère participatif de la démarche et l'évaluation à différentes étapes s'inscrivent dans un processus d'amélioration continue en garantissant la prise en compte de la prévention

des risques professionnels dans le respect des principes généraux de prévention. La collaboration entre les entreprises, les préventeurs, les concepteurs, les instituts de recherche et les SST est nécessaire afin d'améliorer les connaissances sur l'usage professionnel de ces technologies, d'intégrer les besoins de l'utilisateur final au développement des futures générations d'exosquelettes et enfin de co-construire les pratiques de prévention dans lesquelles seront intégrées ces nouvelles technologies.

POINTS À RETENIR

- Il est indispensable d'avoir étudié préalablement l'ensemble des pistes susceptibles de réduire la charge physique de travail avant d'envisager l'usage d'un exosquelette comme solution de prévention.
- Les exosquelettes d'assistance du dos permettent de limiter les contraintes musculaires lombaires lors de tâches mobilisant le tronc en flexion/extension.
- Les exosquelettes d'assistance du membre supérieur permettent de limiter les contraintes musculaires au niveau des épaules lors de tâches impliquant le maintien des bras en hauteur.
- L'usage d'exosquelettes peut avoir des conséquences non-désirées au niveau des muscles antagonistes, des muscles posturaux, et du contrôle du mouvement.
- Les effets non désirés associés à l'usage d'un exosquelette sont à considérer lors de l'évaluation des risques professionnels et du suivi de santé au travail.
- Les bénéfices et les limites des exosquelettes dépendent d'une interaction forte entre sa conception, les caractéristiques individuelles et le type de tâche.
- Une démarche structurée est essentielle, allant de la caractérisation des besoins jusqu'à l'intégration de l'exosquelette en situation de travail, puis suivant les effets à court, moyen et long terme.
- L'entreprise doit mettre en place les conditions permettant l'évaluation des usages de l'exosquelette et l'accompagnement de son acceptation par les opérateurs.
- L'équipe pluridisciplinaire du service de santé au travail a un rôle à jouer dans l'accompagnement de l'entreprise à chacune des étapes de la démarche.
- Le SST doit également être impliqué dans le suivi du déploiement de la technologie à d'autres situations de travail.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 | Rapport Annuel 2018. Assurance Maladie Risques professionnels (https://assurance-mala-die.ameli.fr/sites/default/files/rapport_annuel_2018_assurance_maladie_risques_pro.pdf).
- 2 | DREISTADT S, DE FLAUGERGUES S, SERRES N, YOUSSEF M - Rapport charges & produits AT-MP2017 : éléments statistiques sur les lombalgies. Etude 2016-070. Paris : Assurance Maladie - Risques professionnels ; 2016 : 199 p.
- 3 | THEUREL J, DESBROSSES K - Occupational Exoskeletons: Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019 ; 7 (3-4) : 264-80.
- 4 | ASBECK AT, DE ROSSI SMM, GALIANA I, DING Y ET AL. - Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots. *IEEE Robot Autom Mag*. 2014 ; 21 (4) : 22-33.
- 5 | INGVAST J, VON HOLST H, WIKANDER J - Strengthening glove. Patent. *International Publication Number WO 2008/027002 A1*. 6 March 2008. 2008 : 22 p.
- 6 | DE LOOZE MP, BOSCH T, KRAUSE F, STADLER KS ET AL. - Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. 2016 ; 59 (5) : 671-81.
- 7 | McFARLAND T, FISCHER S - Considerations for Industrial Use: A Systematic Review of the Impact of Active and Passive Upper Limb Exoskeletons on Physical Exposures. *IISE Trans Occup Ergon Hum Factors*. 2019 ; 7 (3-4) : 322-47.
- 8 | THEUREL J, SCHWARTZ M, DESBROSSES K - Potential of back exoskeletons in limiting spinal muscles activity depends on their design and on task modalities. Oral Presentations page 181. In: Premus 2019. 10th International Scientific Conference on the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders. Bologna, Italy, 2-5 September 2019. From research to evidence based sustainable interventions and practices. PREMUS. 2019 (<http://www.premus2019.com/wp-content/uploads/2019/09/PREMUS-2019-Abstract-30.08.19.pdf>).
- 9 | WHITFIELD B, COSTIGAN P, STEVENSON JM, SMALLMAN CL - Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *Int J Ind Ergon*. 2014 ; 44 (1) : 39-44.
- 10 | FROST DM, ABDOLI-ERAMAKI M, STEVENSON JM - PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension

Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail

BIBLIOGRAPHIE (suite)

- moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. *J Electromyogr Kinesiol.* 2009 ; 19 (6) : e403-12.
- 11 | BOSCH T, VAN ECK J, KNITEL K, DE LOOZE M - The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon.* 2016 ; 54 : 212-17.
- 12 | GRAHAM RB, AGNEW MJ, STEVENSON JM - 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. *Appl Ergon.* 2009 ; 40 (5) : 936-42.
- 13 | GODWIN AA, STEVENSON JM, AGNEW MJ, TWIDDY AL ET AL. - Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *Int J Ind Ergon.* 2009 ; 39 (1) : 121-26.
- 14 | LOTZ CA, AGNEW MJ, GODWIN AA, STEVENSON JM - The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *J Electromyogr Kinesiol.* 2009 ; 19 (2) : 331-40.
- 15 | LAMERS EP, SOLTYS JC, SCHERPEREEL KL, YANG AJ ET AL. - Low-profile elastic exosuit reduces back muscle fatigue. *Sci Rep.* 2020 ; 10 (1) : 15958.
- 16 | ABDOLI-ERAMAKI M, STEVENSON JM - The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 2008 ; 23 (3) : 372-80.
- 17 | BALTRUSCH SJ, VAN DIEËN JH, VAN BENNEKOM CAM, HOUDIK H - The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Appl Ergon.* 2018 ; 72 : 94-106.
- 18 | ALABDULKARIM S, NUSSBAUM MA - Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Appl Ergon.* 2019 ; 74 : 55-66.
- 19 | SMETS M - A Field Evaluation of Arm-Support Exoskeletons for Overhead Work Applications in Automotive Assembly. *IIESE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019 ; 7 (3-4) : 192-98.
- 20 | RASHEDI E, KIM S, NUSSBAUM MA, AGNEW MJ - Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics.* 2014 ; 57 (12) : 1864-74.
- 21 | SYLLA N, BONNET V, COLLEDANI F, FRAISSE P - Ergonomic contribution of ABLE exo-skeleton in automotive industry. *Int J Ind Ergon.* 2014 ; 44 (4) : 475-81.
- 22 | DESBROSSES K, SCHWARTZ M, THEUREL J - Postural consequences of the use of upper limb exoskeletons during overhead work: influence of exoskeleton design? Oral Presentations page 182. In: Premus 2019. 10th International Scientific Conference on the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders. Bologna, Italy, 2-5 September 2019. From research to evidence based sustainable interventions and practices. PREMUS. 2019 (<http://www.premus2019.com/wp-content/uploads/2019/09/PREMUS-2019-Abstract-30.08.19.pdf>).
- 23 | HUYSAMEN K, BOSCH T, DE LOOZE M, STADLER KS ET AL. - Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Appl Ergon.* 2018 ; 70 : 148-55.
- 24 | THEUREL J, DESBROSSES K, ROUX T, SAVESCU A - Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl Ergon.* 2018 ; 67 : 211-17.
- 25 | KIM S, NUSSBAUM MA - A Follow-Up Study of the Effects of An Arm Support Exo-skeleton on Physical Demands and Task Performance During Simulated Overhead Work. *IIESE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019 ; 7 (3-4) : 163-74.
- 26 | WESTON EB, ALIZADEH M, KNAPIK GG, WANG X ET AL. - Biomechanical evaluation of exoskeleton use on loading of the lumbar spine. *Appl Ergon.* 2018 ; 68 : 101-08.
- 27 | THEUREL J - Exosquelettes au travail : intérêts et limites pour la prévention des lombalgies et des TMS ? Paris, France, 26 novembre 2019. Compte rendu de la journée technique organisée par l'INRS. Compte rendu de congrès CC 32. *Hyg Secur Trav.* 2020 ; 259 : 94-98.
- 28 | ATAIN-KOUADIO JJ, KERANGUEVEN L, TURPIN-LEGENDE E - Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise. Guide pour les préventeurs. Édition INRS ED 6315. Paris : INRS. 2018 : 32 p.
- 29 | Repères méthodologiques pour le sélection d'un exosquelette professionnel. Édition INRS ED 6416. Paris : INRS ; 2021 (à paraître).
- 30 | VENKATESH V, MORRIS MG, DAVIS GB, DAVIS FD - User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Q.* 2003 ; 27 (3) : 425-78.
- 31 | WIOLAND L, DEBAY L, ATAIN-KOUADIO JJ - Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : évaluation par questionnaire. Vu du terrain TF 274. *Réf Santé Trav.* 2019 ; 160 : 49-76.
- 32 | WIOLAND L, DEBAY L, ATAIN-KOUADIO JJ - Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire. Vu du terrain TF 264. *Réf Santé Trav.* 2019 ; 157 : 45-61.
- 33 | MOYON A, POIRSON E, PETIOT JF - Development of an Acceptance Model for Occupational Exoskeletons and Application for a Passive Upper Limb Device. *IIESE Trans Occup Ergon Hum Factors.* 2019 ; 7 (3-4) : 291-301.
- 34 | GALLET A - Exosquelettes professionnels : rôle et besoins des services de santé au travail pour leur intégration en entreprise. Étude qualitative. 2020. Thèse pour le doctorat en médecine. Lyon : Université Claude Bernard Lyon 1 ; 2020 : 101 p.
- 35 | THEUREL J, ATAIN-KOUADIO JJ, DESBROSSES K, KERANGUEVEN L ET AL. - 10 idées reçues sur les exosquelettes. Édition INRS ED 6295. Paris : INRS. 2018 : 24 p.
- 36 | THEUREL J, CLAUDON L - Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs. État des connaissances. Édition INRS ED 6311. Paris : INRS. 2018 : 32 p.