



Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)

pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles est une association loi 1901, créée en 1947 sous l'égide de la Caisse nationale d'assurance maladie, administrée par un Conseil paritaire (employeurs et salariés).

De l'acquisition de connaissances jusqu'à leur diffusion, en passant par leur transformation en solutions pratiques, l'Institut met à profit ses ressources pluridisciplinaires pour diffuser une culture de prévention dans les entreprises et proposer des outils adaptés à la diversité des risques professionnels à tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, services de santé au travail, instances représentatives du personnel, salariés... Toutes les publications de l'INRS sont disponibles en téléchargement sur le site de l'INRS : www.inrs.fr

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail (Carsat), la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France (Cramif) et les caisses générales de sécurité sociale (CGSS) de l'Assurance maladie - Risques professionnels, disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé notamment d'ingénieurs-conseils et de contrôleurs de sécurité. Spécifiquement formés aux disciplines de la prévention des risques professionnels et s'appuyant sur l'expérience quotidienne de l'entreprise, ces professionnels sont en mesure de conseiller et, sous certaines conditions, de soutenir les acteurs de l'entreprise (direction, médecin du travail, instances représentatives du personnel, etc.) dans la mise en œuvre des démarches et outils de prévention les mieux adaptés à chaque situation. Les caisses assurent aussi la diffusion des publications éditées par l'INRS auprès des entreprises.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'INRS, de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite. Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction, par un art ou un procédé quelconque (article L. 122-4 du code de la propriété intellectuelle). La violation des droits d'auteur constitue une contrefaçon punie d'un emprisonnement de trois ans et d'une amende de 300 000 € (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

© INRS, 2021.

Edition : Nadia Luzeaux (INRS)

Conception graphique : Julie&Gilles

Mise en page: Valérie Latchague-Causse

Illustrations : Jean-André Deledda

ED 6416 |
Juillet 2021

Moyens de prévention
Équipements | Outils de travail

Repères méthodologiques pour la sélection d'un exosquelette professionnel

Brochure INRS élaborée par K. Desbrosses, L. Kerangueven,
M. Schwartz et J. Theurel, en collaboration avec C. Duval.

Sommaire

Introduction	3
Étape 1 – Caractériser la tâche de travail	4
Pourquoi ?	4
Comment ?	4
Exemples de tâches de travail	5
Étape 2 – Sélectionner un exosquelette adapté	7
Pourquoi ?	7
Comment ?	7
Les principales catégories d'exosquelettes	8
Étape 3 – Les conséquences bénéfiques de l'usage de l'exosquelette	10
Pourquoi ?	10
Comment ?	10
Exemples : assistance au niveau du dos	10
Exemples : assistance au niveau des membres supérieurs	12
Et après ?	13
Étape 4 – Évaluer les autres conséquences de l'usage de l'exosquelette	14
Pourquoi ?	14
Comment ?	14
Exemples : assistance au niveau du dos	15
Exemples : assistance au niveau des membres supérieurs	16
Et après ?	17
Conclusion	18
Pour en savoir plus	20

Introduction

Avec l'objectif de réduire la charge physique de travail et le risque de survenue de troubles musculosquelettiques (TMS), les exosquelettes ont fait naître un espoir légitime d'amélioration des conditions de travail. Dans les faits, l'assistance physique proposée à ce jour par les exosquelettes s'avère trop spécifique pour répondre, de manière exhaustive, à la diversité des contraintes physiques auxquelles peuvent être exposés les opérateurs.

Face à ce constat, l'INRS recommande aux entreprises de suivre une démarche structurée qui inclut, à l'issue d'une analyse globale des situations de travail en termes de risque TMS, la caractérisation des besoins de l'opérateur en matière d'assistance physique, l'identification d'un modèle d'exosquelette potentiellement adapté et l'évaluation des performances de ce dispositif. Cette démarche est présentée dans la brochure INRS ED 6315 « Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise. Guide pour les préventeurs ».

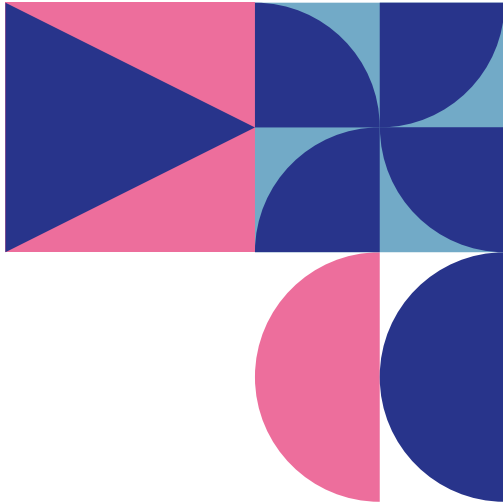
Le présent guide vient en complément de la brochure ED 6315 et vise à fournir des éléments opérationnels pour accompagner dans la mise en œuvre de cette démarche, les chefs d'entreprise, les préventeurs et, plus largement, les différents acteurs de l'entreprise impliqués dans un projet d'acquisition ou d'intégration d'exosquelettes.

Le premier objectif de ce guide est de faciliter le processus de sélection d'un exosquelette. En effet, l'évolution technologique rapide des exosquelettes et leur caractère de plus en plus protéiforme peuvent aujourd'hui compliquer cette étape pour les entreprises, nécessitant en particulier de mobiliser d'importantes ressources humaines et financières. Face à l'étendue des choix possibles, ce guide propose des repères pour identifier le type d'exosquelette le plus à même de répondre aux besoins d'assistance physiques identifiés.

Le deuxième objectif de ce document est d'orienter l'entreprise vers les principaux paramètres à prendre en considération lors de l'évaluation de l'interaction homme-tâche-exosquelette, au regard de la charge physique de travail. Il s'appuie pour cela sur des exemples issus d'évaluations menées dans le cadre d'une étude de laboratoire initiée par l'INRS. Ceux-ci permettent d'illustrer les avantages et limites des grandes catégories d'exosquelettes sur des tâches fréquemment observées en entreprise.

Pour atteindre ces objectifs, quatre étapes sont proposées :

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



Étape 1 – Caractériser la tâche de travail

Lors de cette étape, il convient de définir au mieux les caractéristiques de la tâche de travail en vue de préciser le besoin d'assistance physique.

Pourquoi ?

La littérature scientifique portant sur l'usage professionnel d'exosquelettes démontre aujourd'hui que, dans le cadre de tâches spécifiques (maintien des bras en hauteur ou flexion/extension du tronc par exemple), ces dispositifs s'avèrent relativement efficaces pour limiter les contraintes musculaires locales. C'est sur cette base que les concepteurs présentent leurs exosquelettes comme un moyen de lutter contre les risques de survenue de lombalgies et de TMS des membres supérieurs.

Néanmoins, les bénéfices restent dépendants de l'adéquation entre les conditions de réalisation de la tâche de travail et les caractéristiques physiques de ces dispositifs (voir brochure INRS ED 6311).

La première étape essentielle au choix d'un futur exosquelette est donc de **définir précisément les besoins d'assistance physique** d'un opérateur ou d'une opératrice dans la tâche de travail exécutée.

Comment ?

Acquérir un exosquelette à des fins de prévention implique de connaître finement l'activité de travail. Cette étape exige notamment de s'appuyer sur l'expérience qu'ont les salariés de leurs propres situations de travail et des contraintes associées.

Les contraintes musculaires et autres efforts physiques, les postures habituellement adoptées et les sollicitations cardiaques doivent être plus particulièrement étudiés et questionnés. Il convient également de considérer en priorité le caractère statique ou dynamique de l'activité, les postures adoptées par les opérateurs (inclinaison du tronc ou élévation des bras par exemple) lors des tâches particulièrement sollicitantes et le poids des charges manipulées (voir ED 6311).

À titre d'exemple, sont présentés ici 3 types de tâches de travail souvent rencontrées.

Exemples de tâches de travail

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

Il peut s'agir, par exemple, de tâches de manipulation d'outils (ponceuse, visseuse...) sur des surfaces en hauteur (ponçage, peinture, travail sous caisse...) (voir figure 1).

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



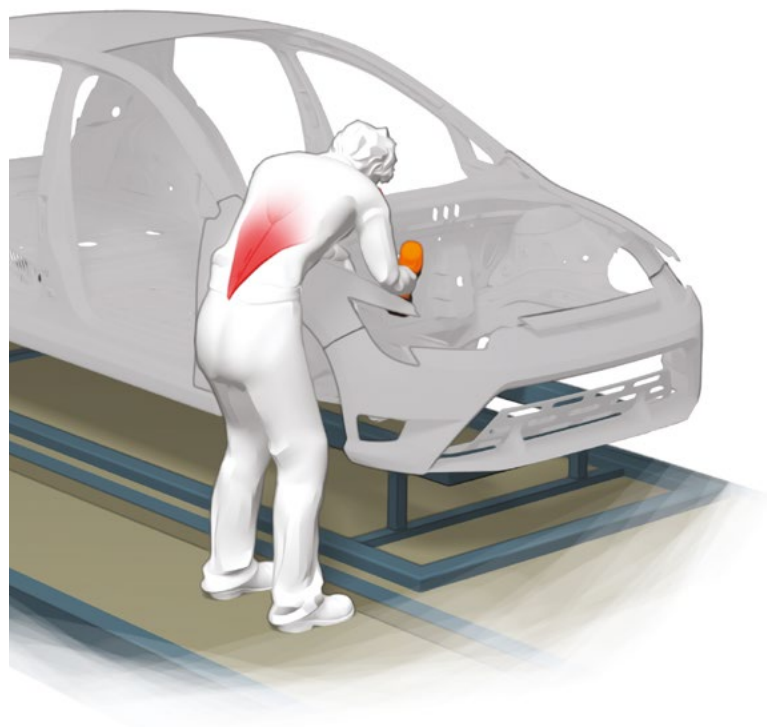
■ Figure 1.

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

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

Tâches dynamiques de manutention manuelle d'une charge

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



■ Figure 2.

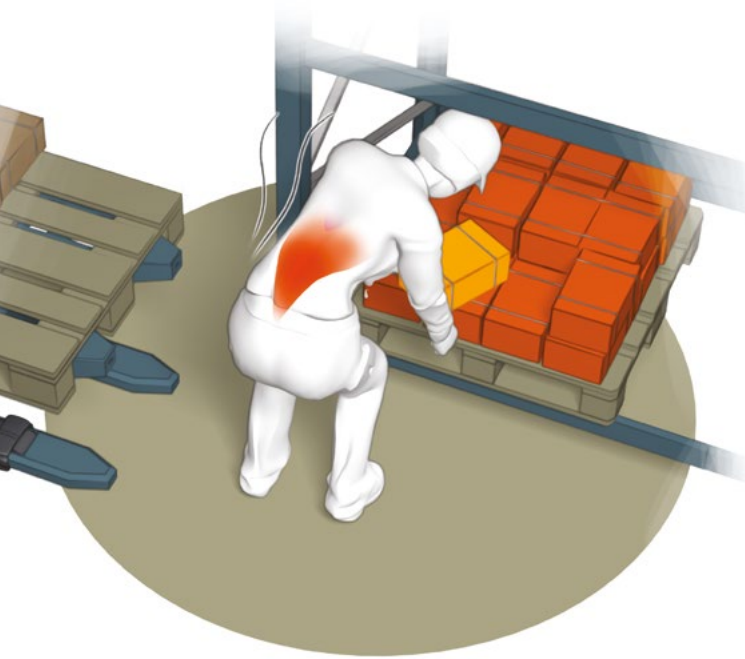
■ Étape 1 – Caractériser la tâche de travail

type de tâches est plus complexe à assister que celles décrites dans les exemples précédents. En effet, ces tâches dynamiques de maintenance peuvent être simultanément associées à des contraintes musculaires au niveau du dos, comme au niveau des membres supérieurs :

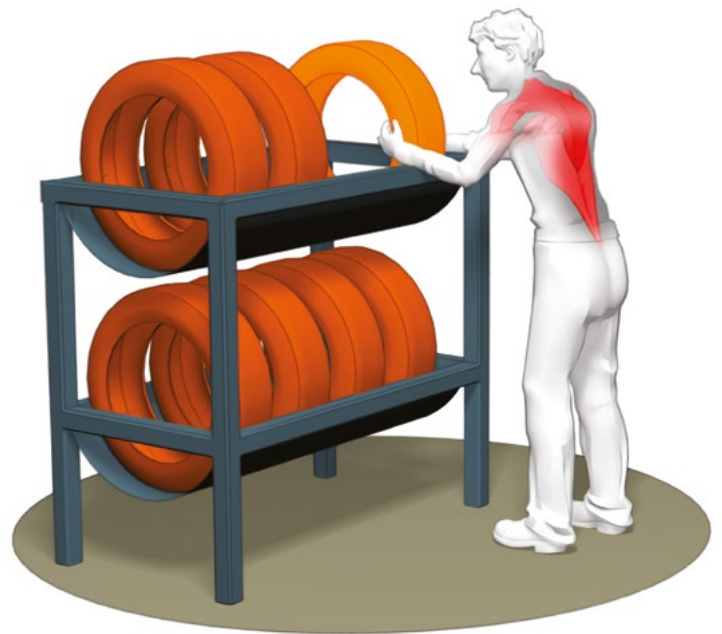
– en impliquant une flexion/extension du tronc dans l'axe ou en rotation, ces tâches sont généralement associées à une sollicitation importante des muscles du dos, en condition dynamique, sur une amplitude importante de mouvement (figure 3) ;

– en impliquant une élévation des bras, ce type de tâche peut également s'avérer particulièrement sollicitant pour les muscles des membres supérieurs, au niveau des épaules, des coudes et des poignets (figure 4).

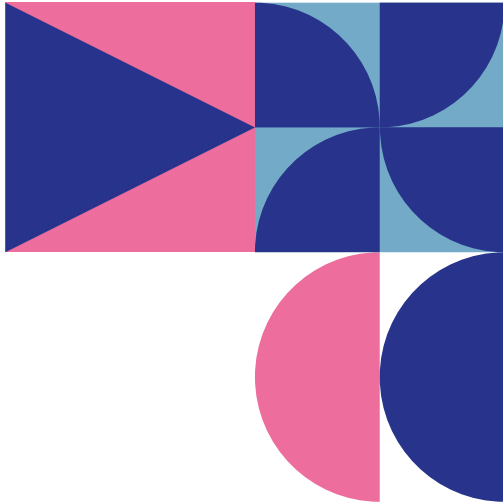
Selon les principaux risques musculosquelettiques identifiés et le contexte dans lequel l'activité de travail est réalisée, la priorité pourra être donnée à l'assistance physique du dos ou des membres supérieurs. À ce jour, l'offre d'exosquelettes permettant d'assister simultanément différentes parties du corps reste très peu développée.



■ Figure 3.



■ Figure 4.



Étape 2 – Sélectionner un exosquelette adapté

Lors de cette étape, il convient de déterminer une catégorie d'exosquelettes adaptée aux besoins d'assistance physique qui auront été identifiés.

Pourquoi ?

Face à la diversité croissante des modèles d'exosquelette disponibles sur le marché, la démarche de sélection de ces équipements peut s'avérer difficile et coûteuse pour l'entreprise. Cette étape consiste à déterminer une catégorie d'exosquelettes susceptible de répondre aux besoins d'assistance physique préalablement identifiés.

Comment ?

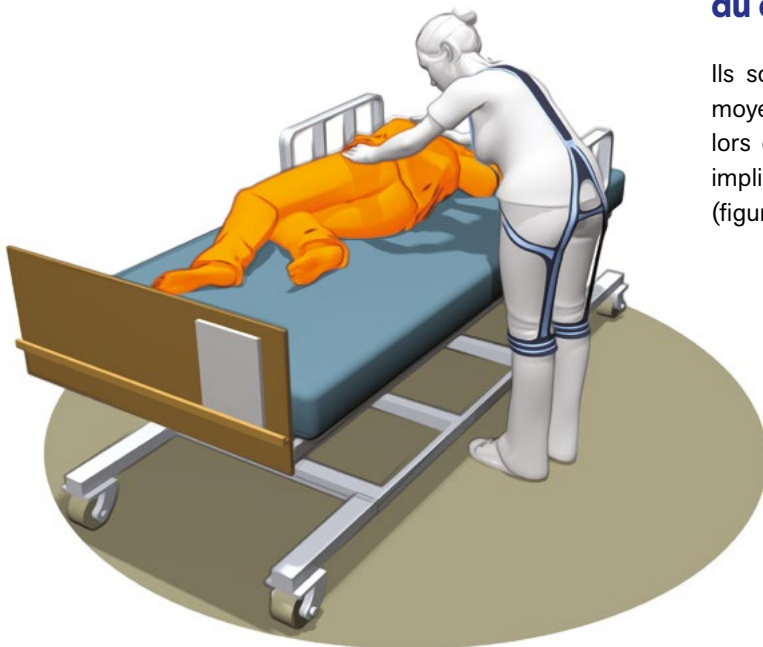
À l'heure actuelle, les exosquelettes offrent des performances d'assistance physique très localisées (dos, épaules, mains, etc.). Même si les tâches de manutention manuelle sont à l'origine de sollicitations physiques pour l'ensemble du corps, il

reste nécessaire de différencier les exosquelettes en fonction des principales contraintes identifiées pour la tâche de travail ciblée (voir étape 1). Certains sont développés pour réduire les contraintes localisées au niveau du dos tandis que d'autres sont conçus pour assister les efforts principalement localisés au niveau des membres supérieurs, par exemple.

Par ailleurs, leurs caractéristiques techniques contribuent aussi à leurs performances. La plupart des exosquelettes proposent aujourd'hui une assistance physique non motorisée fonctionnant sur le principe de restitution de l'énergie préalablement emmagasinée :

- En ce qui concerne les exosquelettes assistant les muscles du dos, on peut par exemple distinguer les exosquelettes souples (voir exosquelettes textiles d'assistance des muscles du dos), pour lesquels l'assistance est fournie par des élastiques, des exosquelettes rigides (voir exosquelettes rigides d'assistance des muscles du dos) pour lesquels l'assistance est fournie par des ressorts ou des matériaux mis en tension (par exemple, des lames en matériau composite). Les niveaux d'assistance fournis, la localisation des points de contact, ainsi que l'action du corps nécessaire à la mise en tension du système (flexion du dos ou de la hanche) peuvent varier d'un modèle à un autre.

- En ce qui concerne les exosquelettes assistant les muscles des « membres supérieurs », tous sont conçus à partir de matériaux « rigides » de type ressorts ou lames en matériaux composites. Il est cependant nécessaire de distinguer les systèmes dédiés uniquement à l'assistance de l'épaule, proposant un support au niveau du bras (entre l'épaule et le coude) (voir exosquelettes d'assistance des épaules) de ceux conçus pour prendre en charge plusieurs articulations du membre supérieur (épaule, coude, voire poignet), proposant un support au niveau de l'extrémité de l'avant-bras ou de la main (voir exosquelettes d'assistance des membres supérieurs).



■ Figure 5.

Les principales catégories d'exosquelettes

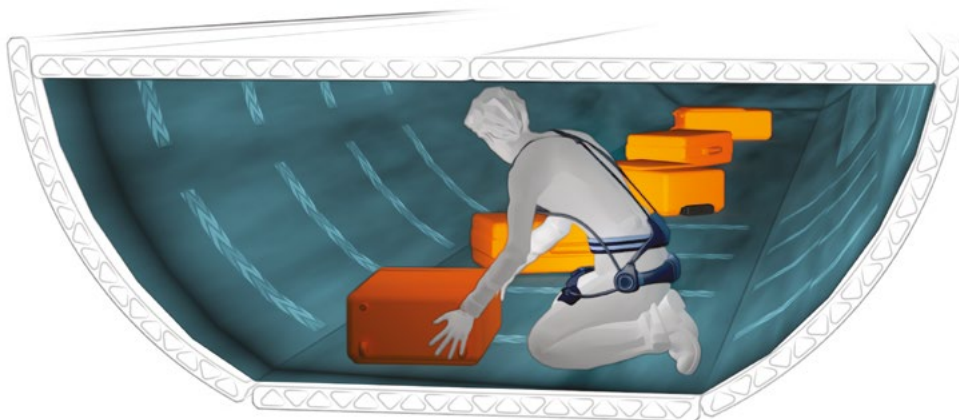
À ce jour, quatre principales catégories d'exosquelettes à usage professionnel, et visant à répondre aux problématiques de lombalgies et de TMS du membre supérieur, ont été identifiées sur le marché.

Les exosquelettes souples d'assistance des muscles du dos

Ils sont conçus pour assister le dos au moyen de structures textiles élastiques, lors de tâches dynamiques ou statiques impliquant une inclinaison du tronc (figure 5).

Les exosquelettes rigides d'assistance des muscles du dos

Ils sont conçus pour assister le dos au moyen d'un dispositif mécanique (structure rigide, ressorts, etc.), lors de tâches dynamiques ou statiques impliquant une inclinaison du tronc (figure 6).



■ Figure 6.

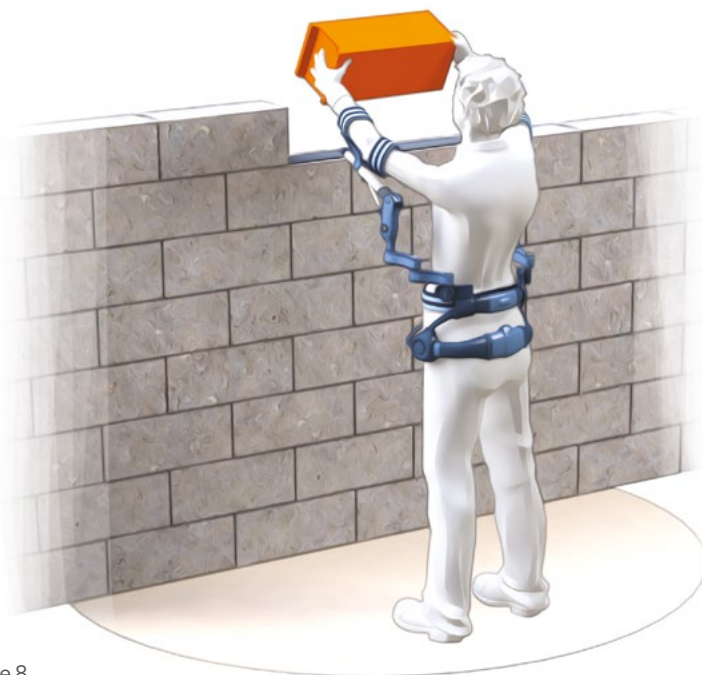
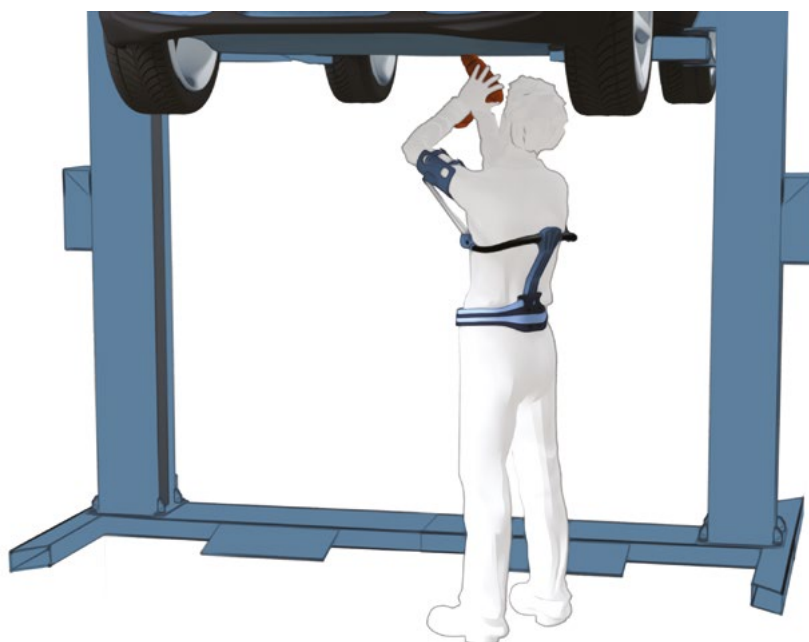
Les exosquelettes d'assistance des épaules

Ils sont conçus pour assister uniquement les muscles des épaules lors du maintien des mains au-dessus de la tête, au moyen d'un dispositif mécanique (structure rigide, ressorts, etc.) (figure 7).

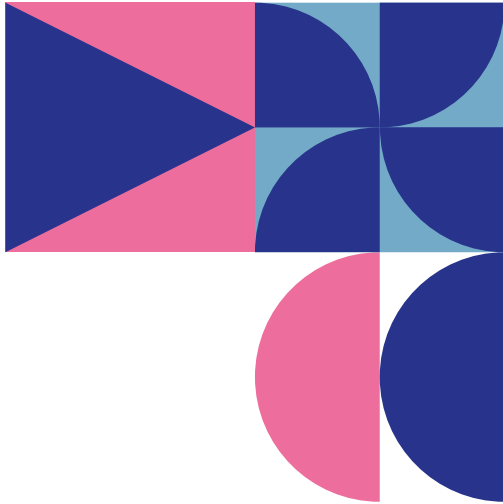
Les exosquelettes d'assistance des membres supérieurs

Ils sont conçus pour assister, au moyen d'un dispositif mécanique (structure rigide, ressorts, etc.), l'ensemble des articulations des membres supérieurs (épaules, coudes, voire poignets) lors d'actions de manutention manuelle (figure 8).

■ Figure 7.



■ Figure 8.



Étape 3 – Les conséquences bénéfiques de l’usage de l’exosquelette

Pourquoi ?

Même si le processus de sélection évoqué dans les étapes 1 et 2 de ce guide a permis de cibler un exosquelette potentiellement adapté aux besoins d'assistance, il reste nécessaire de s'assurer que, dans une situation de travail donnée, les bénéfices attendus sont présents. En effet, au sein d'une même catégorie d'exosquelettes, les performances d'assistance peuvent légèrement varier.

Comment ?

Après l'identification d'un ou plusieurs exosquelettes susceptibles de répondre aux besoins d'assistance physique, il est nécessaire de vérifier auprès des concepteurs, fournisseurs ou intégrateurs que leurs produits sont en mesure de répondre effectivement au principal besoin d'assistance physique préalablement défini. Il s'agit ensuite 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 (voir ED 6315). 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. Plusieurs exemples de ces outils sont proposés aux préventeurs dans la brochure ED 6315.

À titre d'exemple, les résultats d'évaluations¹ des bénéfices apportés par des modèles d'exosquelette représentatifs de chacune des 4 catégories décrites dans ce guide, et utilisées pour des tâches adaptées, sont présentés ci-dessous.

Remarque

Lors de cette étape, ces tâches peuvent être définies avec différents niveaux de charge afin que les bénéfices soient évalués en correspondance avec le besoin d'assistance physique caractérisé.

Exemples : assistance au niveau du dos

Cette partie présente les bénéfices associés aux deux principales catégories d'exosquelettes offrant une assistance physique au niveau du dos : les exosquelettes souples et les exosquelettes rigides (ou mécaniques) d'assistance du dos. Ceux-ci ont été utilisés ici au cours de deux tâches sollicitant en particulier les muscles du dos, à savoir les tâches impliquant le maintien statique

1. Ces résultats sont issus d'une étude au cours de laquelle différentes tâches de travail simulées ont été réalisées en laboratoire avec et sans exosquelettes.

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

Exosquelettes souples

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

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

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

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

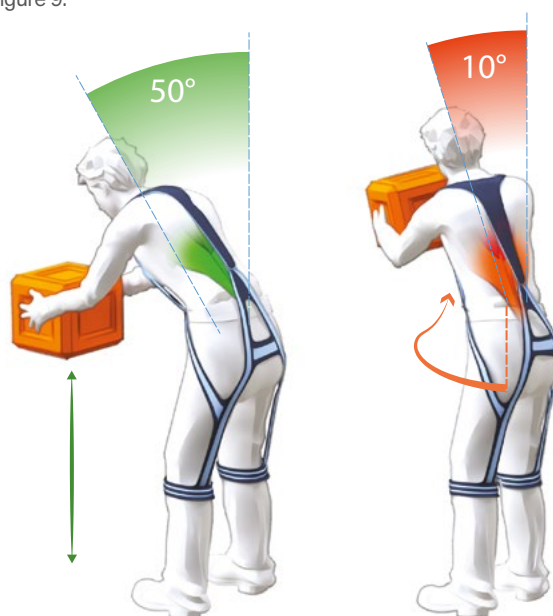
Exosquelettes rigides

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

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



■ Figure 9.



■ Figure 10.

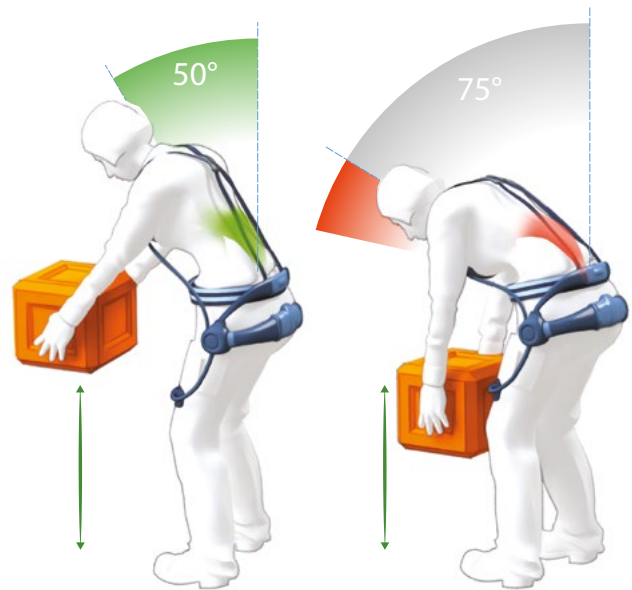


■ Figure 11.

fortes inclinaisons (> 75°), l'exosquelette induit une contrainte accrue au niveau des muscles lombaires, ce qui est probablement dû à un soutien limité et à une modification de la courbure lombaire. Cette élévation de l'activité musculaire peut favoriser l'apparition de lombalgies. Cet exemple montre clairement que des modifications du poste de travail sont à privilégier avant d'envisager l'usage d'un exosquelette ;

- tâches dynamiques de manutention impliquant une flexion/extension du tronc : cet exosquelette mécanique d'assistance du dos (figure 12) permet de réduire l'effort des muscles lombaires sur une grande partie du mouvement. Les bénéfices, variant de 5 à 20 %, dépendent de l'inclinaison du tronc, ceux-ci étant les plus importants pour des angles proches de 30°. Lorsque la tâche de manutention inclut une rotation du tronc, la performance est réduite à une plage d'inclinaison du tronc plus restreinte (de 25 à 50°).

Pour de fortes inclinaisons (> 75°), ce type d'exosquelette est contre-indiqué, celui-ci induisant, tout comme en condition statique, une contrainte accrue au niveau des muscles lombaires.



■ Figure 12.



■ Figure 13.

Exemples : assistance au niveau des membres supérieurs

Cette partie présente les bénéfices associés aux deux principales catégories d'exosquelettes offrant une assistance physique au niveau des membres supérieurs : les exosquelettes d'assistance des épaules et les exosquelettes d'assistance des membres supérieurs. Ceux-ci ont été utilisés, respectivement dans une tâche impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, des bras en hauteur (voir étape 1), et dans une tâche dynamique de manutention manuelle de charge, impliquant une élévation des membres supérieurs (voir étape 1).

Exosquelettes d'assistance des épaules

Dans cet exemple (figure 13), le besoin d'assistance physique est attendu au niveau des

membres supérieurs et plus particulièrement au niveau de l'épaule, où s'exercent les principales contraintes musculaires. L'évaluation de l'activité des muscles éleveurs des bras (deltôïdes et trapèzes) a été faite en comparant des situations « sans » et « avec » exosquelette.

Il s'avère que cet exosquelette rigide d'assistance des épaules est efficace pour réduire le niveau de sollicitation des muscles éleveurs des bras lors d'une tâche de travail mains au-dessus de la tête.

Exosquelettes d'assistance des membres supérieurs

Ce type d'exosquelette a été conçu pour réduire les efforts musculaires nécessaires à l'élévation

des membres supérieurs. L'assistance est portée au niveau des mains de manière à soulager les articulations de l'épaule, du coude et du poignet. Les principaux bénéfices sont donc à attendre au niveau de ces articulations. L'activité des muscles de l'épaule, éleveurs du bras, et des muscles fléchisseurs du coude, est donc à évaluer en priorité. Les résultats sont présentés pour une tâche de manutention consistant à déplacer des charges d'une position basse vers ou position haute, impliquant une forte sollicitation des membres supérieurs sur l'ensemble du mouvement.

L'exosquelette rigide d'assistance des membres supérieurs réduit les efforts des muscles fléchisseurs des épaules sur la quasi-totalité du mouvement. Lors de la prise et de la dépose de la charge en position basse, cet exosquelette peut, au contraire, entraîner une légère augmentation du niveau de sollicitation des muscles censés être assistés (figure 14).



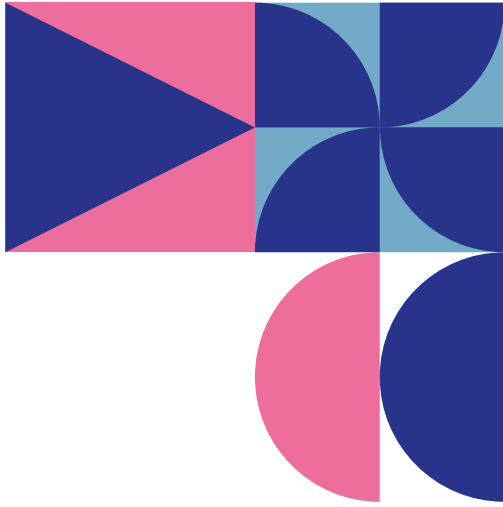
■ Figure 14.

À retenir

Au regard de ces exemples, il apparaît que toutes les catégories d'exosquelettes peuvent apporter des bénéfices en termes de réduction des efforts musculaires, dans la mesure où ils ont été sélectionnés pour un besoin d'assistance physique clairement identifié. Toutefois, au-delà des caractéristiques de l'exosquelette, l'amplitude des bénéfices 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.

Et après ?

Si l'adéquation entre l'exosquelette et le besoin d'assistance physique identifié est validée par les salariés concernés et les préventeurs, la suite du processus d'évaluation peut être engagée (voir étape 4). En revanche, si l'évaluation des performances d'assistance de l'exosquelette s'avère insatisfaisante au regard des sollicitations associées à la tâche de travail et des objectifs de prévention, la démarche d'acquisition de cet exosquelette doit être interrompue. D'autres modèles d'exosquelette de la même catégorie peuvent éventuellement être évalués, mais l'entreprise doit également se questionner, à nouveau, sur les possibilités d'aménager la situation de travail, ainsi que sur les solutions d'automatisation.



Étape 4 – Évaluer les autres conséquences de l’usage de l’exosquelette

Pourquoi ?

Si les performances d'assistance physique des exosquelettes sont avérées, il importe également d'évaluer plus largement les conséquences de l'usage de ces technologies, en termes de santé et sécurité. Il s'agit plus particulièrement d'étudier les effets « non souhaités » qui pourraient être à l'origine de nouveaux risques pour l'utilisateur. À ce stade, l'enjeu principal est de garantir sa santé et sa sécurité ainsi que celle de ses collègues, ce qui contribue à l'acceptation du dispositif.

Comment ?

À l'instar de l'évaluation des bénéfices, différents outils d'évaluation peuvent être mobilisés. Les effets potentiels sont à rechercher en fonction de l'évaluation globale des risques présents dans la situation de travail (voir brochure INRS ED 6315), en intégrant notamment les conditions de réalisation de la tâche de travail et les risques associés. Les effets à évaluer en priorité doivent également être déterminés en fonction des caractéristiques de l'exosquelette et des potentiels effets

Tableau 1. Muscles indirectement sollicités par l'usage des exosquelettes

	Exosquelettes textiles d'assistance du dos	Exosquelettes mécaniques d'assistance du dos	Exosquelettes mécaniques d'assistance des épaules	Exosquelettes mécaniques d'assistance des bras
Muscles ayant une action inverse (antagoniste) à l'assistance de l'exosquelette	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fléchisseurs du tronc (abdominaux) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fléchisseurs du tronc (abdominaux) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abaisseurs du bras (triceps) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abaisseurs du bras (triceps)
Autres muscles liés au contrôle postural et/ou sollicités lors de la manutention	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muscles des jambes (jambier antérieur + quadriceps) ▪ Élévateurs des bras (deltoïdes + trapèzes) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muscles des jambes (jambier antérieur + quadriceps) ▪ Élévateurs des bras (deltoïdes + trapèzes) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muscles des jambes (jambier antérieur) ▪ Extenseur du dos (lomaires) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Muscles des jambes (jambier antérieur) ▪ Extenseur du dos (lomaires)

délétères associés. Des renseignements doivent être pris auprès du concepteur de l'exosquelette envisagé, en capacité d'informer sur les limites ou les risques associés à l'usage de son produit. Il s'agit par exemple de vérifier que d'autres muscles (tableau 1) ne soient pas affectés par l'usage de l'exosquelette, notamment par un transfert des contraintes, ou même du fait du poids du système.

Au-delà des efforts musculaires, le contrôle de l'équilibre postural, associé au risque de chutes et autres accidents avec perturbation du mouvement, doit également être évalué pour la majorité des exosquelettes.

À titre d'exemple, les résultats d'évaluations² des effets non souhaités, pour des modèles d'exosquelette représentatifs des 4 catégories précédemment identifiées, sont présentés ci-après.

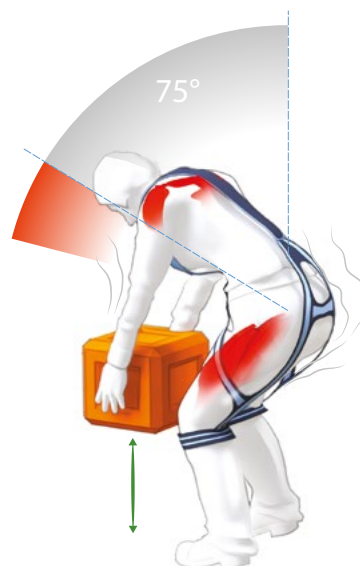
Exemples : assistance au niveau du dos

Cette partie présente les effets « non souhaités » associés à l'usage des deux principales catégories d'exosquelette offrant une assistance physique au niveau du dos : les exosquelettes textiles (ou souples) et les exosquelettes rigides (ou mécaniques) d'assistance du dos. Ceux-ci ont été utilisés lors d'une tâche dynamique de manutention manuelle de charge, impliquant une flexion/extension du tronc (voir étape 1), et sollicitant principalement les muscles du dos.

Exosquelettes souples

Pour les positions du tronc les plus fléchies, l'assistance textile, alors très étirée, augmente la sollicitation des muscles élévateurs des membres supérieurs, probablement en exerçant une force de pression au niveau des épaules (zones de contact avec le système). Un inconfort, une fatigue musculaire précoce ou même des troubles de la

circulation veineuse/lymphatique ou encore une compression nerveuse pourraient être observés en cas d'utilisation prolongée (figure 15).



■ Figure 15.

Lors des tâches dynamiques, l'exosquelette modifie également l'activité des muscles fléchisseurs du tronc et des membres inférieurs. Pour ces derniers, il est possible que les zones de contact du système sur le haut du tibia forcent l'extension du genou, expliquant ainsi l'augmentation de l'activité de certains muscles au niveau des membres inférieurs. Les augmentations observées ici, même minimales, sont à considérer au regard de la durée d'utilisation de l'exosquelette, car elles pourraient conduire à la survenue d'un inconfort ou d'une fatigue musculaire accrue, en plus d'autres sources potentielles d'inconfort (compression locale, gêne au retour veineux des membres inférieurs, etc.).

Enfin, l'usage de cet exosquelette peut légèrement perturber l'équilibre postural lors d'une tâche de manutention manuelle avec rotation du tronc, engendrant un risque d'accident.

Exosquelettes rigides

Cet exosquelette peut induire une activité accrue des muscles abdominaux (fléchisseurs du tronc) lors de la phase d'inclinaison du tronc. Ces

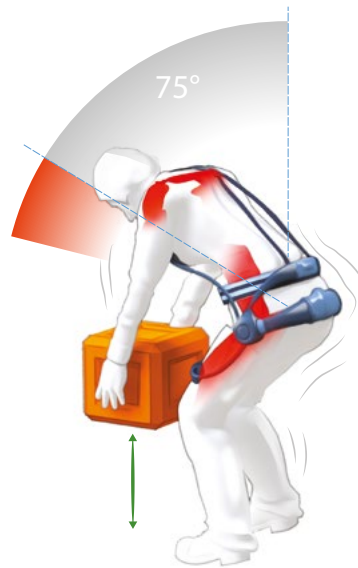
2. Ces résultats sont issus d'une étude au cours de laquelle différentes tâches de travail simulées ont été réalisées en laboratoire avec et sans exosquelettes.

contraintes apparaissent plus prononcées lorsque la tâche inclut une rotation du tronc.

Par ailleurs, les appuis (zones de contact homme-exosquelette) localisés au niveau des cuisses, semblent modifier la posture des membres inférieurs. L'activité des muscles des membres inférieurs est ainsi affectée. L'appui thoracique de l'exosquelette modifie également la posture du tronc et des membres supérieurs, induisant ainsi une légère augmentation de l'activité des muscles élévateurs des bras (figure 16).

Ces sollicitations musculaires accrues sont à considérer au regard de la durée de l'utilisation de l'exosquelette. Même si l'augmentation des contraintes reste minime, celles-ci pourraient engendrer un inconfort voire une fatigue accrue chez l'utilisateur lors de l'utilisation prolongée de l'exosquelette.

Par ailleurs, cet exosquelette perturbe l'équilibre postural de l'utilisateur (et ainsi accentue le risque d'accident) lors de sa mise en tension (phase d'inclinaison du tronc) et plus particulièrement en rotation.



■ Figure 16.

Cependant, l'équilibre postural est légèrement perturbé, en particulier pour des charges manutentionnées de moins de 5 kg, vis-à-vis des performances d'assistance du système. Pour les charges légères, les masses situées à l'avant (charge portée + bras de l'exosquelette) et à l'arrière (poids de la structure de l'exosquelette) de l'utilisateur ne sont pas équilibrées. À l'inverse, l'équilibre se trouve moins affecté lors de la manutention d'une charge de plus de 5 kg. Dans ce cas très spécifique, les efforts des muscles lombaires sont identiques avec et sans exosquelette.

Exemples : assistance au niveau des membres supérieurs

Cette seconde partie présente les effets non souhaités associés aux exosquelettes d'assistance des épaules et aux exosquelettes d'assistance des membres supérieurs. Ceux-ci ont été utilisés, respectivement, dans une tâche impliquant le maintien statique, ou quasi-statique, des bras en hauteurs, et dans une tâche dynamique de manutention manuelle de charge, impliquant l'élévation des bras (voir étape 1).

Exosquelettes d'assistance des épaules

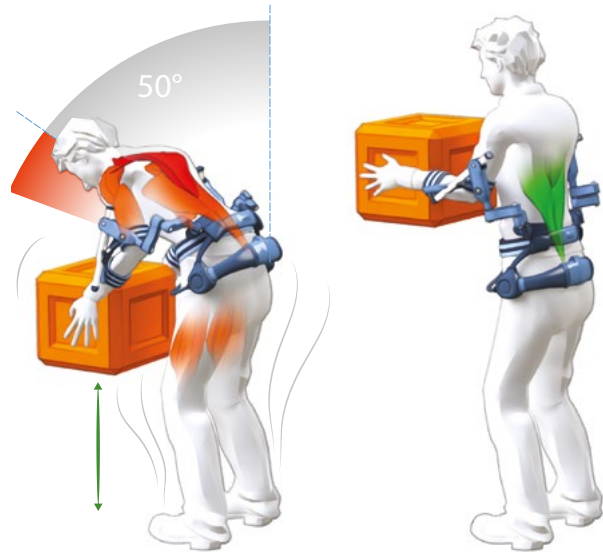
L'utilisation des exosquelettes rigides d'assistance des épaules en conditions statiques permet de soulager les muscles abaisseurs des bras et extenseurs du dos, ce qui signifie qu'il répond aux besoins d'assistance (figure 17).



■ Figure 17.

Exosquelettes d'assistance des membres supérieurs

L'usage de cet exosquelette dans les tâches dynamiques engendre des contraintes accrues pour l'ensemble des muscles investigués lors de cette étape. L'augmentation de l'activité des muscles extenseurs de l'épaule et du coude (triceps) est probablement due au niveau élevé d'assistance fourni par cet exosquelette. Celui-ci nécessite une mise en tension préalable par les muscles abaisseurs des bras (compression des ressorts). Une augmentation de l'activité des muscles extenseurs du tronc (lombaires) est également observée, en particulier lors de la tâche en rotation du tronc et lorsque le tronc de l'utilisateur est fortement incliné ($> 50^\circ$). Le poids additionnel du système (9 kg) et le déséquilibre généré par son utilisation sont à l'origine d'une augmentation de l'activité des muscles des jambes, assurant l'équilibre (actionnant la cheville, notamment). Toutefois, l'exosquelette réduit l'activité des muscles lombaires lorsque l'utilisateur est dans une posture redressée ($< 25^\circ$ d'inclinaison du tronc). La structure mécanique du système favorise le gainage du tronc (figure 18).



rales de l'usage des exosquelettes sur des tâches bien spécifiques. En situation réelle de travail, l'activité des opérateurs est variée. L'usage de ces technologies peut également ralentir ou limiter les déplacements et certains mouvements et occasionner d'autres effets indésirables (frottements, pressions cutanées, gêne circulatoire, risques d'accident, risques psychosociaux...) qu'il convient également de prendre en compte dans l'analyse des risques, en considérant la situation de travail dans sa globalité.

Et après ?

À ce stade, il convient d'évaluer l'intérêt de cette solution en mettant en balance les bénéfices apportés pour la partie du corps assistée avec les contraintes et risques potentiels pouvant survenir. Cette évaluation constituera le principal élément d'aide à la décision quant à la poursuite ou non de la démarche d'acquisition de l'exosquelette initialement envisagé.

S'il est décidé de poursuivre l'acquisition 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'un suivi. En outre, si l'exosquelette est utilisé dans une autre situation de travail, le processus d'évaluation doit alors être renouvelé.

Enfin, il est important de mentionner que les évaluations menées dans ces exemples ne portent que sur les conséquences musculaires et postu-

À retenir

Les exemples présentés ici indiquent que l'usage d'exosquelettes, quelle que soit leur conception, entraîne aussi d'autres effets que ceux attendus. Ceux-ci peuvent se révéler bénéfiques en termes de prévention des TMS ou au contraire délétères. 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. Ces effets dépendent des caractéristiques de la tâche (statique ou dynamique, mono ou multi-axes), des parties du corps assistées, des postures adoptées et des charges manutentionnées. À l'instar des bénéfiques, les autres conséquences de l'usage d'un exosquelette peuvent également être influencées par les caractéristiques individuelles de l'utilisateur (taille, poids, morphologie, genre, expérience, déficits fonctionnels...). Des évaluations doivent donc être menées en situation réelle de travail, avec les opérateurs à qui l'usage de ces technologies est destiné.

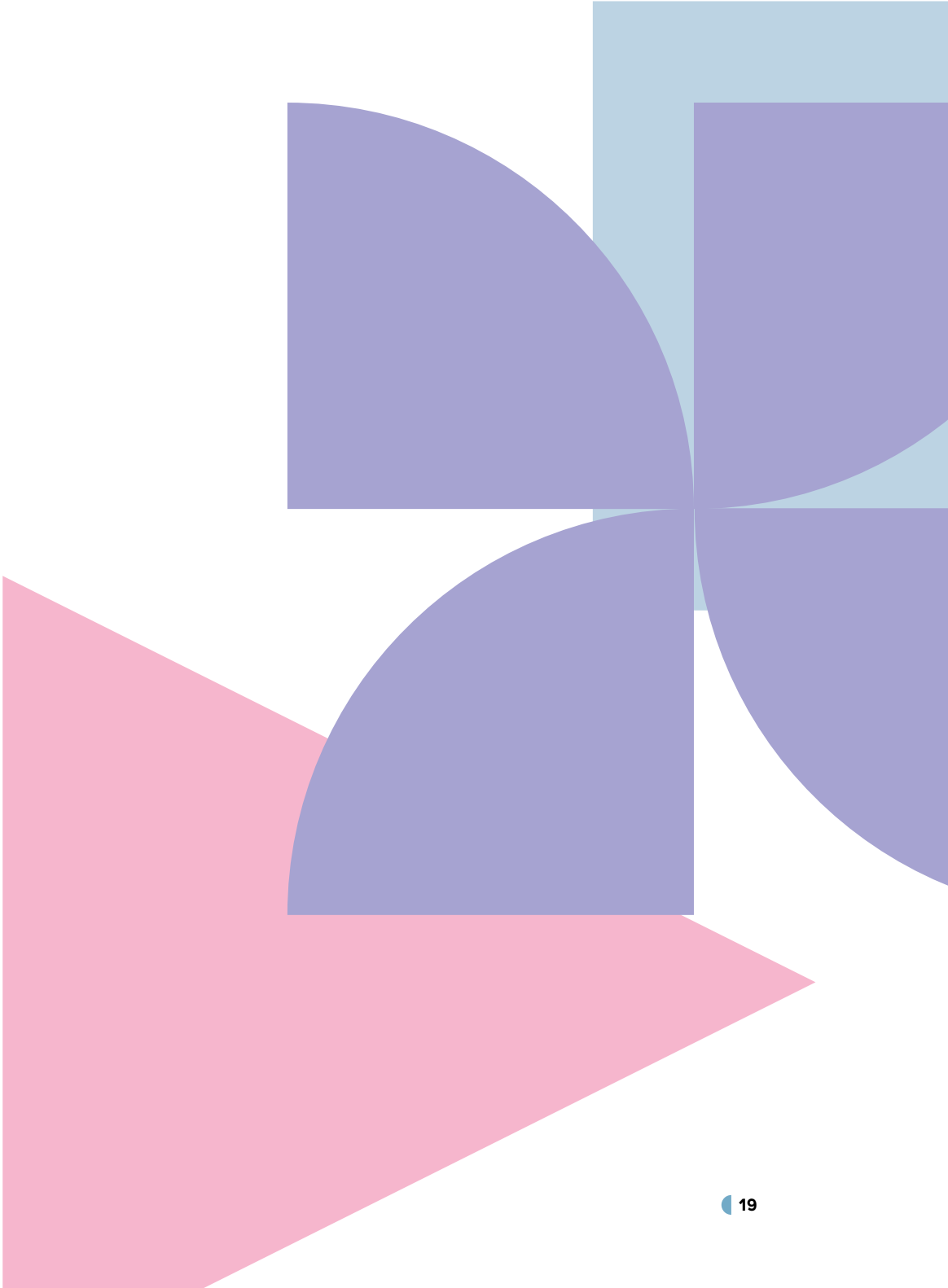
Conclusion

Ce guide permet aux chefs d'entreprise, préventeurs et, plus largement, aux différents acteurs de l'entreprise impliqués dans un projet d'acquisition ou d'intégration d'exosquelettes, d'ajuster le choix de la catégorie d'exosquelette envisagée en fonction des besoins d'assistance physique du futur utilisateur. Si dans la démarche d'acquisition d'un exosquelette, les acteurs de la prévention dans l'entreprise se doivent d'analyser finement les tâches de travail pour lesquelles cette solution est envisagée, les concepteurs et intégrateurs ont, eux, la responsabilité d'apporter des informations précises quant aux spécificités des exosquelettes qu'ils proposent (technologie d'assistance, poids, équilibre, etc.), et aux domaines de performance (plage angulaire optimale, niveau d'assistance, charge manipulée, etc.) de leurs produits, ainsi qu'aux points de vigilance sur les effets indésirables associés à leur usage.

Les résultats présentés en exemple dans ce document révèlent que toutes les catégories d'exosquelettes testées peuvent apporter des bénéfices significatifs en matière d'assistance physique. L'usage de ces exosquelettes peut néanmoins être à l'origine de nouvelles contraintes qu'il convient d'évaluer. La nature et l'ampleur des bénéfices et des contraintes observées dépendent des caractéristiques de l'utilisateur, de l'activité réalisée (position de travail adoptée, charge manipulée, durée de réalisation, etc.) comme des caractéristiques techniques de l'exosquelette (point de contact, poids, raideur, etc.).

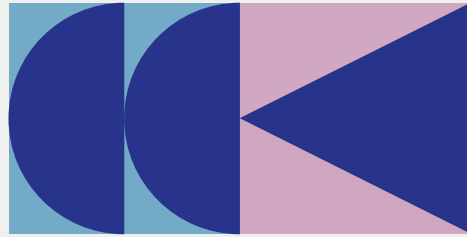
Par ailleurs, les exemples rapportés dans les étapes 3 et 4 de ce guide comportent plusieurs critères pouvant nourrir l'évaluation de l'interaction homme/exosquelette, indispensable pour décider de la poursuite ou non du processus d'intégration. Elles devront être complétées par une évaluation des autres risques liés à l'usage d'exosquelette (mécaniques, électriques...) mais aussi les dimensions liées aux salariés, à la structure et à l'activité réalisée.

À cette étape, il est essentiel de poursuivre la démarche d'intégration par la mise en œuvre de la phase 3 de la brochure ED 6315, en s'appuyant sur des retours d'expérience à court, moyen et long terme, afin de remettre régulièrement en question les apports de l'exosquelette en fonction des évolutions de la situation de travail.



Pour en savoir plus

www.inrs.fr



S'INFORMER EN AMONT

- 10 idées reçues sur les exosquelettes. **ED 6295.**
- Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs. État des connaissances. **ED 6311.**
- Usage d'un exosquelette d'assistance des bras : bénéfices et contraintes lors de tâches de manutention. **NT 62.**
- Dossier web Exosquelettes : <https://www.inrs.fr/risques/exosquelettes/ce-qu-il-faut-retenir.html>

AGIR EN ENTREPRISE

- Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise. Guide pour les préventeurs. **ED 6315.**
- Les exosquelettes pour prévenir les troubles musculosquelettiques et rôle des services de santé au travail. **TC 175.**
- Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire. **TF 264.**
- Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : évaluation par questionnaire. **TF 274.**
- Exosquelettes au travail : comment s'y préparer. **Vidéo dessinée Anim-131.**

BÉNÉFICIER DE RETOURS D'EXPÉRIENCE

- Journée technique : Exosquelettes au travail : intérêts et limites pour la prévention des TMS ? **CC 32.**
- Reportage exosquelettes. *Travail et sécurité*, n° 810, novembre 2019.
- Table ronde télévisée exosquelettes. Replay disponible sur la chaîne Youtube de l'INRS.

Toutes les publications de l'INRS sont téléchargeables sur www.inrs.fr

Pour commander les publications de l'INRS au format papier

Les entreprises du régime général de la Sécurité sociale peuvent se procurer les publications de l'INRS à titre gratuit auprès des services prévention des Carsat/Cramif/CGSS.

Retrouvez leurs coordonnées sur www.inrs.fr/reseau-am

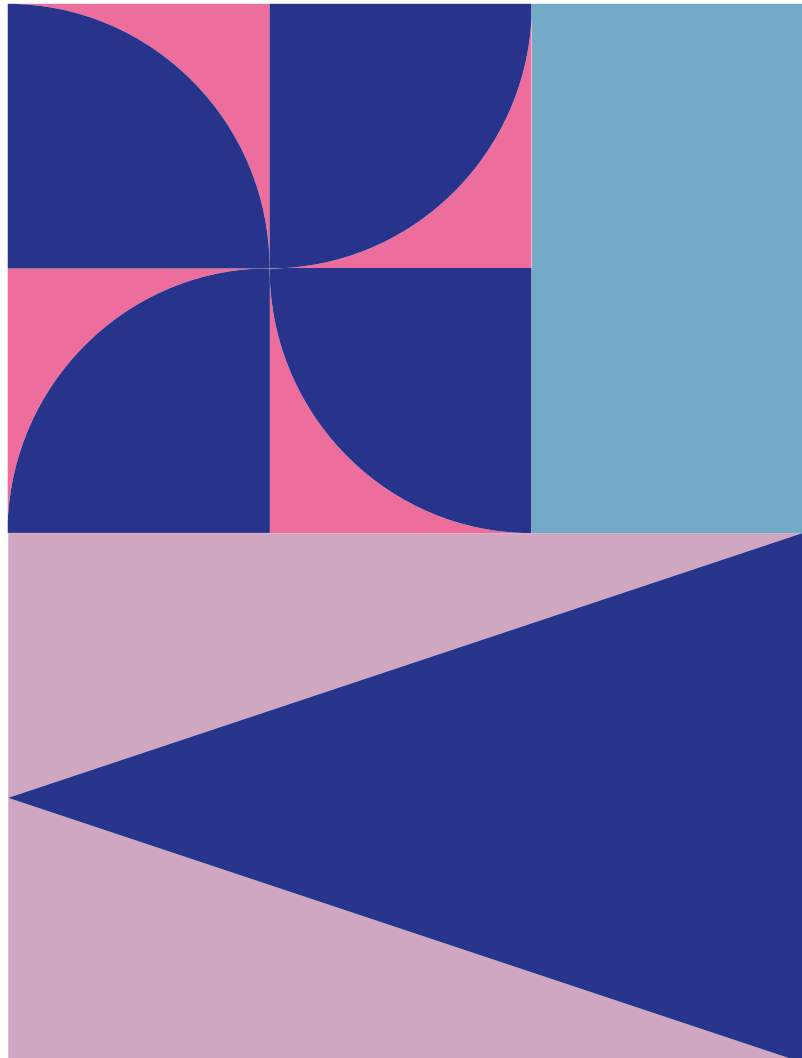
L'INRS propose un service de commande en ligne pour les publications et affiches, payant au-delà de deux documents par commande.

Les entreprises hors régime général de la Sécurité sociale peuvent acheter directement les publications auprès de l'INRS en s'adressant au service diffusion par mail à service.diffusion@inrs.fr

Cette brochure vise à accompagner de manière opérationnelle les différents acteurs de l'entreprise, dans une démarche d'acquisition ou d'intégration d'exosquelettes.

Son objectif est de faciliter le processus de sélection d'un exosquelette, rendu aujourd'hui difficile par la vitesse de l'évolution technologique et la diversité des équipements.

Elle propose également d'identifier les principaux paramètres à prendre en compte lors de l'évaluation de l'interaction homme-tâche-exosquelette, au regard de la charge physique de travail.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail
et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris
Tél. 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 6416

1^{re} édition | juillet 2021 | ISBN 978-2-7389-2672-2 | Document uniquement disponible en pdf

L'INRS est financé par la Sécurité sociale
Assurance maladie - Risques professionnels