



# Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs

État des connaissances

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

Dans le domaine de la prévention des risques professionnels, l'INRS est un organisme scientifique et technique qui travaille, au plan institutionnel, avec la CNAM, les Carsat, Cramif, CGSS et plus ponctuellement pour les services de l'État ainsi que pour tout autre organisme s'occupant de prévention des risques professionnels.

Il développe un ensemble de savoir-faire pluridisciplinaires qu'il met à la disposition de tous ceux qui, en entreprise, sont chargés de la prévention : chef d'entreprise, médecin du travail, instances représentatives du personnel, salariés. Face à la complexité des problèmes, l'Institut dispose de compétences scientifiques, techniques et médicales couvrant une très grande variété de disciplines, toutes au service de la maîtrise des risques professionnels.

Ainsi, l'INRS élabore et diffuse des documents intéressant l'hygiène et la sécurité du travail : publications (périodiques ou non), affiches, audiovisuels, multimédias, site Internet...

Les publications de l'INRS sont distribuées par les Carsat.

Pour les obtenir, adressez-vous au service Prévention de la caisse régionale ou de la caisse générale de votre circonscription, dont l'adresse est mentionnée en fin de brochure.

L'INRS est une association sans but lucratif (loi 1901) constituée sous l'égide de la CNAM et soumise au contrôle financier de l'État. Géré par un conseil d'administration constitué à parité d'un collège représentant les employeurs et d'un collège représentant les salariés, il est présidé alternativement par un représentant de chacun des deux collèges. Son financement est assuré en quasi-totalité par la CNAM sur le Fonds national de prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

## **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)**

Les caisses d'assurance retraite et de la santé au travail, la caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France et les caisses générales de sécurité sociale disposent, pour participer à la diminution des risques professionnels dans leur région, d'un service Prévention composé 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, ils 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. Ils assurent la mise à disposition de tous les documents édités par l'INRS.

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 euros (article L. 335-2 et suivants du code de la propriété intellectuelle).

# **Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs**

État des connaissances

Jean Theurel, INRS  
Laurent Claudon, INRS



# Sommaire

Introduction ..... 5

## 1 L'émergence des exosquelettes dans la lutte contre les TMS

- 1.1 Les troubles musculosquelettiques (TMS) ..... 6
- 1.2 Nouvelles technologies d'assistance physique ..... 7
- 1.3 Les exosquelettes ..... 7

## 2 Intérêts et limites des exosquelettes dans la prévention des lombalgies

- 2.1 Rappel sur les lombalgies ..... 9
- 2.2 Les exosquelettes d'assistance du dos ..... 10
- 2.3 Conséquences lors de tâches ..... 11  
de manutention manuelle
- 2.4 Conséquences lors de tâches en position ..... 14  
statique contraignante
- 2.5 Bilan ..... 16

## 3 Intérêts et limites des exosquelettes dans la prévention des TMS des membres supérieurs

- 3.1 Les exosquelettes d'assistance ..... 17  
des membres supérieurs
- 3.2 Conséquences physiologiques de l'usage ..... 18  
d'un exosquelette en situation de travail
- 3.3 Bilan ..... 22

Conclusion ..... 24

Bibliographie ..... 26



# Introduction

Les exosquelettes sont aujourd'hui déployés ou testés dans de nombreux secteurs (industrie, logistique, BTP, transport, etc.). Ces systèmes mécaniques ou textiles, revêtus par le salarié, visent à lui apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts ou une augmentation de ses capacités motrices. Au-delà de la prévention des troubles musculosquelettiques (TMS), l'espoir est de préserver la santé des salariés, de réduire l'absentéisme et le turn-over, d'aider le retour au travail de personnes faisant l'objet de restrictions d'aptitude.

Malgré l'espoir légitime d'amélioration des conditions de travail que suscite l'arrivée des exosquelettes sur le marché, il est nécessaire d'anticiper les éventuelles conséquences de leur usage sur la santé et la sécurité en entreprise. Le rôle des préventeurs est, à ce titre, primordial. Ils doivent prendre en compte ce nouveau contexte, impliquant une interaction entre l'opérateur et son exosquelette, et avoir épuisé en amont les pistes de prévention collectives, visant avant tout à adapter l'environnement de travail pour préserver les salariés des risques professionnels.

Ce guide, destiné aux préventeurs, fait un point sur les connaissances actuelles afin de mettre en évidence les intérêts et les limites de l'usage des exosquelettes en matière de prévention des TMS. L'objectif est d'aider à mieux appréhender l'impact des exosquelettes pour accompagner efficacement l'entreprise dans sa démarche d'acquisition et d'intégration d'un exosquelette.

# 1

## L'émergence des exosquelettes dans la lutte contre les TMS

### 1.1 Les troubles musculosquelettiques (TMS)

Le rôle des activités de travail dans la survenue des troubles musculosquelettiques (TMS) fait l'objet d'un large consensus depuis de nombreuses années. Ils représentent un objet majeur de préoccupation en termes de santé au travail. Les affections du rachis (lombalgies) et des membres supérieurs (MS) constituent les pathologies les plus fréquentes [1, 2]. Les contraintes biomécaniques associées à l'activité de travail figurent parmi les facteurs de risque prépondérants de survenue des TMS [3]. 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 solutions 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 durable-



ment exposés aux efforts musculaires intenses (plus de 30 % des actifs), aux gestes répétitifs (63 %), ainsi qu'aux postures contraignantes (46 %) [4]. Ainsi, près de 40 % des travailleurs souffriraient chaque année, en France comme en Europe, de douleurs au niveau du dos, de la nuque ou des épaules [4, 5].

## 1.2 Nouvelles technologies d'assistance physique

À l'instar de la robotique collaborative, on assiste aujourd'hui à l'émergence de nouvelles technologies d'assistance physique dans les entreprises. Censées réduire l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, ces nouvelles technologies font naître un espoir légitime d'amélioration des conditions de travail. Parmi ces innovations, les exosquelettes (EXO) semblent particulièrement prisés par les entreprises. Au-delà des enjeux de productivité, ils devraient limiter l'exposition des opérateurs aux contraintes biomécaniques de leurs postes tout en préservant leur savoir-faire, leur autonomie de décision ainsi que leur mobilité.

Pensés dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les exosquelettes visant à améliorer la mobilité humaine n'ont accéléré leur démocratisation que très récemment à des fins d'applications médicales, militaires, mais également industrielles. Face à ces différents besoins applicatifs, les EXO se sont aujourd'hui développés sous des formes extrêmement variées, profitant notamment des avancées accomplies dans le domaine de la robotique et de la plasticité et légèreté des matériaux composites modernes.

## 1.3 Les exosquelettes

L'assistance physique développée par ces systèmes peut être générée par un principe de restitution d'énergie mécanique (ressorts, élastiques) (*voir figure 1 page suivante*) : on parle alors de dispositifs d'assistance physique (DAP). L'assistance physique peut également être produite par un système

robotisé (couple commande-moteur) (voir figure 2) : il s'agit alors de robots d'assistance physique (RAP). Le nombre d'articulations mobilisées ainsi que le nombre de degrés de liberté par articulation sont également très variables selon les systèmes. Les EXO se différencient également en fonction de la partie du corps qu'ils visent à assister. On distingue ainsi des exosquelettes destinés à soulager les membres supérieurs (EXO<sub>MS</sub>), le dos (EXO<sub>DOS</sub>), les membres inférieurs (EXO<sub>MI</sub>) ou le corps entier (EXO<sub>CE</sub>) [6].

Pour l'heure, il apparaît que les EXO<sub>DOS</sub> et EXO<sub>MS</sub> sont, de loin, les plus répandus dans les entreprises. L'objectif annoncé par les promoteurs des exosquelettes est de lutter efficacement contre le risque de lombalgies et de TMS des membres supérieurs. Ce document, qui repose sur une analyse de la littérature, a pour premier enjeu de recueillir les preuves disponibles quant à l'efficacité prétendue des EXO pour réduire ces contraintes biomécaniques au travail. Il s'agit également de discuter des bénéfices réels et des risques potentiels liés à l'usage de ces dispositifs. Enfin, l'objectif est aussi de mettre en exergue les principaux manques dans les connaissances actuelles, afin d'alerter les professionnels de la prévention quant aux points de vigilance auxquels être attentif.



Figure 1



Figure 2

# 2

## Intérêts et limites des exosquelettes dans la prévention des lombalgies

### 2.1 Rappel sur les lombalgies

Dans la majorité des cas, les mécanismes à l'origine des douleurs lombaires sont complexes car multifactoriels. Les lombalgies sont notamment associées à de nombreux facteurs de risques individuels tels que l'âge, les capacités physiques (et motrices), le tabagisme, le surpoids, ou encore l'état émotionnel. Parmi les facteurs professionnels, au-delà des lésions occasionnées par des chutes et d'autres accidents par perturbation du mouvement, les contraintes biomécaniques de l'activité (efforts intenses, postures contraignantes) sont les facteurs prépondérants de risque [1, 7, 8]. En plus des lombalgies de survenue brutale, l'exposition répétée à des efforts lombaires sous-maximaux peut également conduire à ce type de pathologies [9]. Par exemple, les efforts nécessitant des mouvements répétés en flexion ou en torsion du tronc, les tâches en position maintenue ou en position assise, ainsi que les activités de conduite et celles exposant aux vibrations, sont connus pour leur implication dans l'occurrence des pathologies lombaires [10].

## 2.2 Les exosquelettes d'assistance du dos

Aujourd'hui, il existe de nombreux modèles d'EXO<sub>DOS</sub>, développés pour réduire les efforts des muscles lombaires. Le principe commun à ces différents systèmes est d'assister l'extension de la hanche et le redressement de la colonne vertébrale dans le plan sagittal. Les dispositifs élastiques sont actuellement plus couramment rencontrés en entreprise que les exosquelettes de type robotisés, encore souvent en phase de développement. L'aide au mouvement est alors assurée par un élément élastique central, disposé dans le dos de l'opérateur, en parallèle des muscles érecteurs spinaux et extenseurs de la hanche, ou sur la partie ventrale du tronc. Ce dernier, mis en tension lors de la flexion du tronc dans le plan sagittal, favorise alors le redressement du corps, pour reprendre sa position initiale (voir figure 3). En ce qui concerne les modèles robotisés, la structure externe est généralement conçue sur un principe et une architecture similaires aux précédents, mais l'extension de la hanche et du dos est assistée par une motorisation électrique ou par un système pneumatique. Celui-ci génère un couple de force dans l'axe transversal du bassin, favorisant également l'extension du rachis dans le plan sagittal (voir figure 4).



Figure 3



Figure 4

Quels sont les avantages et limites de ces technologies pour les opérateurs exposés aux deux principaux facteurs de risques biomécaniques, à savoir les efforts dynamiques intenses d'une part, et les postures contraignantes d'autre part ? Les résultats observés sur deux tâches représentatives de ces deux facteurs de risque sont présentés ci-dessous.

## 2.3 Conséquences lors de tâches de manutention manuelle

### ► Conséquences sur l'effort des muscles lombaires

D'une manière générale, la littérature scientifique semble s'accorder sur l'efficacité des EXO<sub>DOS</sub> pour limiter les contraintes musculaires lombaires lors de tâches de manutention, strictement opérées dans le plan sagittal (qui est le plan d'action vertical d'avant en arrière pour l'opérateur concerné). Dans ce cas, les données expérimentales connues révèlent que les modèles non robotisés permettent de réduire l'effort des muscles lombaires de 10 à 40 % en moyenne [11, 12, 13, 14].

Abstraction faite des légères différences observées dans ces études (concernant, par exemple, la population, la tâche ou la position), les écarts constatés quant à l'amplitude des baisses d'activité musculaire avec et sans exosquelette pourraient être principalement liés aux caractéristiques mécaniques des exosquelettes étudiés. Une relation positive entre le niveau de raideur de l'EXO et l'amplitude de la baisse d'activité des muscles lombaires a ainsi été démontrée. Il semble donc indispensable que cette caractéristique soit adaptable et adaptée en fonction des efforts exigés par la tâche à accomplir. Néanmoins, il faut rester prudent dans la recherche d'une assistance accrue, car l'amplification excessive de la raideur du système pourrait se traduire par une augmentation du travail des muscles abdominaux, actifs lors de la phase de flexion du tronc (c'est-à-dire lors de la mise en tension du système) [13]. Or, cette augmentation de l'activité des muscles antagonistes<sup>1</sup> pourrait s'avérer contreproductive dans le cadre

---

<sup>1</sup> Muscle antagoniste : muscle dont la fonction s'oppose au mouvement réalisé lors de la contraction du muscle agoniste.

de la prévention des lombalgies ; celle-ci pouvant affecter l'équilibre des forces et, ainsi, la stabilité de la colonne vertébrale. L'enjeu serait alors d'optimiser les caractéristiques de l'exosquelette vers une assistance suffisante pour préserver les muscles lombaires des contraintes biomécaniques excessives en extension du tronc, sans entraîner de compensation significative des muscles abdominaux. À défaut d'un réglage adapté, il n'est pas exclu que l'usage de ce type d'exosquelette puisse s'avérer néfaste.

L'émergence prochaine des exosquelettes robotisés pourrait éventuellement permettre aux usagers de s'affranchir de ce type de problème. Cette catégorie d'EXO<sub>DOS</sub> pourrait en effet être capable de générer des niveaux d'assistance plus importants lors du redressement du corps, sans accroître le travail des muscles antagonistes, puisqu'ils ne nécessitent pas de mise en tension préalable. Lors de tâches de manutention en flexion/extension du buste, certains auteurs ont ainsi rapporté des réductions de 30 à 60 % de l'activité des muscles lombaires avec un EXO<sub>DOS</sub> robotisé, en comparaison avec une tâche similaire sans équipement [15, 16]. Ces résultats doivent néanmoins être considérés avec prudence, compte tenu de la taille réduite des échantillons. Bien que prometteurs, les EXO<sub>DOS</sub> actifs restent en phase de développement. Leur poids excessif et leur manque d'autonomie énergétique constituent, pour l'heure, des freins importants à une application industrielle.

### ► Conséquences sur la fatigue des muscles lombaires

Compte tenu de la réduction des efforts des muscles lombaires associée à l'utilisation d'un exosquelette lors de tâches ponctuelles de manutention, il paraît légitime que ces systèmes limitent la fatigue lors d'une activité de manutention prolongée. Plusieurs études tendent à confirmer cette hypothèse pour des tâches durant de 45 minutes à 1 heure [17, 18]. 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'évolution des capacités musculaires à l'échelle de la journée, ou même de la semaine, pourraient s'avérer pertinentes pour se rapprocher des conditions réelles d'usage en entreprise.

### ► Conséquences sur la posture

Des analyses ont permis de démontrer que, lors de tâches de manutention en flexion du tronc, la baisse des sollicitations lombaires avec un EXO<sub>DOS</sub> était en partie due à une diminution des mouvements de rotation (-24 %) et de flexion latérale (-30 %) du buste [12]. Si les EXO<sub>DOS</sub> peuvent amener à restreindre la mobilité du buste lors de tâches codifiées, de nouvelles questions apparaissent quant à l'influence de ces dispositifs sur les contraintes musculaires de la chaîne posturale lors d'activités de manutention moins standardisées, exigeant des mouvements dans plusieurs plans. Il a toutefois été démontré dans une étude que les gains apportés par un exosquelette au niveau des muscles lombaires, lors de tâches de redressement avec charge, étaient similaires quelles que soient les techniques de levage étudiées [11] (mouvements standards (en squat) et techniques libres). Ces travaux tendent ainsi à suggérer que l'efficacité de ces systèmes serait davantage liée à la tâche qu'au geste permettant de la réaliser.

### ► Conséquences sur les contraintes vertébrales

Les EXO<sub>DOS</sub> pourraient également constituer un moyen efficace de réduire les forces internes de compression portant sur les vertèbres lombaires (L4-L5) [11, 19, 20]. Plus précisément, les évaluations biomécaniques réalisées lors d'études précédentes [19, 20] ont permis d'estimer que l'usage d'un EXO<sub>DOS</sub> non robotisé lors d'une activité de manutention manuelle en flexion/extension du tronc pourrait permettre de réduire les forces de compression sur les vertèbres lombaires de 23 à 29 %. Or, les mécanismes de compression discale peuvent intervenir lors d'efforts violents imposés aux muscles dorsaux, en particulier lorsque ceux-ci sont fatigués, occasionnant ainsi des lésions et des douleurs dans la région lombaire. En ce sens, il semble que les EXO<sub>DOS</sub> puissent apporter un réel bénéfice en termes de prévention face à ce risque d'accident. Néanmoins, comme vu précédemment, il paraît indispensable d'adapter la raideur des EXO<sub>DOS</sub> dans le cas de tâches de manutention de charges lourdes. L'utilisation prochaine de modèles actifs pourrait également être préconisée, si ceux-ci venaient à confirmer leur potentiel lors de protocoles expérimentaux rigoureux.

## 2.4

### Conséquences lors de tâches en position statique contraignante

#### ► Conséquences sur les efforts musculaires

À l'instar des efforts dynamiques lors de tâches de manutention manuelle, les EXO<sub>DOS</sub> semblent également efficaces pour réduire le travail des muscles lombaires lors de tâches statiques, imposant le maintien prolongé du buste en flexion vers l'avant [19, 21]. Au cours de ce type de tâche, l'usage d'un EXO<sub>DOS</sub> non robotisé permettrait, en moyenne, une baisse de l'activité des muscles lombaires d'environ 10 à 40 % selon les études [6]. L'association à une réduction de l'activité des muscles mobilisant la hanche (-24 %) et le cou (-50 %) laissait supposer que l'ensemble de la chaîne musculaire posturale (hanche, lombaire, dorsal et cervical) pourrait être préservé par l'utilisation de l'EXO<sub>DOS</sub>.

Toutefois, même si la majorité de ces résultats s'accorde sur les intérêts des EXO<sub>DOS</sub> pour soulager les efforts musculaires, induits par le maintien prolongé d'une posture contraignante, de fortes disparités peuvent être constatées quant à l'amplitude des réductions d'activité des muscles lombaires. Comme évoqué dans le paragraphe précédent, le niveau de raideur (assistance) de ces dispositifs pourrait avoir une incidence importante sur la réponse des muscles lombaires engagés dans le maintien postural.

#### ► Conséquences sur la fatigue musculaire

Aucune modification significative du niveau de fatigue n'a pu être observée au niveau des muscles lombaires au cours de tâches de maintien postural [19, 21]. L'alternance de phases d'activité et de repos dans la réalisation des tâches examinées [19] et la durée insuffisante de celles-ci [21] pourraient en partie expliquer l'absence de fatigue observée, que ce soit avec ou sans dispositif d'assistance.

Or, lors de contractions maintenues, les manifestations de la fatigue des muscles posturaux peuvent être induites par des troubles vasculaires



périphériques locaux [22] ; de ce fait, même une baisse substantielle du niveau de force maintenue peut être favorable à l'oxygénation musculaire et ainsi limiter les signes de fatigue. L'utilisation d'un EXO<sub>DOS</sub> dans ce contexte pourrait donc s'avérer efficace dans la prévention de la fatigue musculaire.

### ► Conséquences sur la perception des douleurs

Parallèlement, il a été observé un bénéfice significatif lié à l'usage d'un EXO<sub>DOS</sub> sur la douleur lombaire ressentie par les opérateurs au cours d'une tâche d'assemblage de deux heures en position de flexion du tronc vers l'avant (30°) [19]. Ces résultats ont été très récemment confortés par d'autres travaux [21] qui ont démontré une augmentation significative (+ 200 %) du temps d'endurance sans douleur, grâce à l'utilisation d'un exosquelette non robotisé au cours d'une tâche de maintien postural, buste maintenu incliné vers l'avant (40°).

Or, l'intensité des douleurs lombaires en fin de journée de travail est reconnue comme un facteur de risque de survenue des lombalgies. Les douleurs lombaires survenant lors d'une activité posturale seraient en effet à l'origine d'une augmentation de la raideur des muscles concernés, phénomène aggravant de la lombalgie. En outre, les douleurs lombaires mènent généralement les individus à adopter des postures antalgiques qui peuvent s'avérer, elles-mêmes, délétères sur l'équilibre statique. Probablement liée à la réduction de l'activité des muscles lombaires avec un EXO<sub>DOS</sub>, cette baisse de la douleur perçue est en faveur d'un apport bénéfique de ces nouvelles technologies pour réduire le risque de lombalgies.

### ► Conséquences sur la posture

Des adaptations posturales spécifiques, dont l'extension accrue des genoux en flexion du buste, ont été observées chez les opérateurs équipés d'exosquelettes [21]. Ces observations apparaissent d'autant plus remarquables que celles-ci sont inverses aux postures adoptées naturellement par les patients lombalgiques lors de ce type de mouvement.

En effet, les postures antalgiques se répercutent généralement sur l'ensemble de la chaîne posturale et, en particulier, par un déficit d'extension des genoux lors de la flexion du buste.

Si le port d'un EXO<sub>DOS</sub> induit des changements de stratégies posturales, de nombreuses questions restent alors à élucider. Par exemple, il paraît légitime de s'interroger sur l'impact de ces changements sur l'équilibre statique et dynamique (par exemple, la locomotion), ainsi que sur les potentielles compensations musculaires induites sur l'ensemble de la chaîne posturale.

## 2.5 Bilan

Les observations rapportées par les précédentes études tendent à confirmer l'intérêt potentiel des EXO<sub>DOS</sub> dans la prévention des lombalgies. L'analyse des données expérimentales suggère néanmoins de porter une attention particulière à l'influence des caractéristiques mécaniques des dispositifs non robotisés afin d'optimiser le niveau d'assistance fourni, en fonction des modalités de la tâche et des caractéristiques de l'utilisateur. À défaut, l'utilisation de ce type d'exosquelette pourrait être responsable de compensations musculaires antérieures et donc, potentiellement, d'un déséquilibre de la charnière abdominale. Des modifications significatives des stratégies posturales aux différents étages de la chaîne posturale (cheville, genou, hanche, rachis cervical, etc.) pourraient également être observées.

# 3

## Intérêts et limites des exosquelettes dans la prévention des TMS des MS

### 3.1 Les exosquelettes d'assistance des membres supérieurs

Les TMS des membres supérieurs (MS) représentent aujourd'hui une forte problématique sanitaire et économique dans l'ensemble des pays développés. En France, environ 90 % des TMS déclarés concernent les membres supérieurs [5]. Parmi eux, près de 30 % impliquent l'épaule qui semble être le siège de pathologies récurrentes des membres supérieurs parmi les plus sévères. Si la survenue de TMS de l'épaule peut être liée à des facteurs multiples de risque, elle est souvent associée aux contraintes professionnelles. Sur le plan biomécanique, la survenue des tendinopathies de l'épaule serait, en particulier, 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, la manutention de charges lourdes, les gestes répétés ou encore l'utilisation d'outils vibrants.

Fort de ce constat, des EXO<sub>MS</sub> commerciaux ont récemment été conçus pour réduire l'effort des muscles de l'épaule lors de ce type de tâches dynamiques. Sur le plan technique, bien que certains exosquelettes robotisés revendiquent aujourd'hui des systèmes d'activation performants, électriques, pneumatiques ou hydrauliques, et qu'ils soient en mesure d'assister plusieurs articulations (main, coude, membre supérieur complet) sur un grand nombre de degrés de liberté, ils présentent également un certain nombre de limites (par exemple, poids, encombrement, manque de fluidité, faible autonomie énergétique). Pour répondre aux enjeux industriels, on assiste donc principalement au développement d'EXO<sub>MS</sub> non robotisés. Ces dispositifs consistent le plus souvent en un harnais de support, revêtu par l'opérateur, sur lequel sont fixés un ou deux bras externes articulés (voir figure 1, page 8). L'assistance est fournie par un système élastique ou à ressort, mis en tension par l'abaissement des membres supérieurs et actionnant en retour le ou les bras mécaniques. Ces derniers sont généralement attachés à l'opérateur au niveau des avant-bras, des bras ou même directement au niveau de l'outil ou de la charge à manipuler [23]. De par cette conception, le principal effet de l'usage de ces exosquelettes pourrait être de réduire les efforts musculaires associés à l'élévation des bras dans ses différents plans d'action (sagittal, frontal et scapulaire).

### 3.2 Conséquences physiologiques de l'usage d'un exosquelette en situation de travail

Les études ayant évalué les bénéfices potentiels de l'usage d'un exosquelette d'assistance du membre supérieur sur la réduction des contraintes biomécaniques associées au travail, ont focalisé leur attention sur les activités nécessitant une élévation des bras au-dessus de la tête (voir encadré) [23, 24]. Ces situations de travail constituent effectivement l'un des principaux facteurs de risques professionnels de survenue des tendinopathies de la coiffe des rotateurs, du fait notamment d'une compression des tendons et des muscles et d'une altération de la circulation sanguine.

Seuls des travaux de l'INRS [25] ont, à ce jour, examiné les conséquences de l'usage d'un EXO<sub>MS</sub> lors de tâches plus diversifiées de manutention manuelle.

## Un exosquelette pour soulager des postures contraignantes

*Des observations ont été menées par l'INRS dans une entreprise spécialisée dans les métiers d'arts liés au plâtre utilisant un exosquelette pour des tâches très spécifiques et contraignantes nécessitant une élévation des bras au-dessus de la tête. Le ressenti des utilisateurs à l'égard de l'exosquelette était positif et cohérent avec les données issues d'études précédentes. Par ailleurs, les utilisateurs ont indiqué exercer moins de force sur l'outil, adopter des postures moins sollicitantes et constater la disparition de certaines douleurs. Les opérateurs ont aussi clairement indiqué percevoir l'effet du transfert (par l'exosquelette) des contraintes générées lors d'un travail au-dessus de la tête vers l'ensemble du corps. Par ailleurs, l'utilisation de l'exosquelette a amené des modifications en termes de modes opératoires, de stratégies gestuelles déployées et d'organisation pour effectuer la tâche. Ce dernier constat confirme l'importance d'analyser et de comprendre l'impact de l'exosquelette à travers les évolutions des expertises des opérateurs. Ce retour positif sur l'utilisation des exosquelettes s'explique aussi par leur haute technicité et expertise dans un secteur où la concurrence est faible, mais également par la volonté de l'entreprise de préserver ses salariés.*

### ► Conséquences sur l'activité et la fatigue musculaire

En 2014, l'usage d'un EXO<sub>MS</sub> non robotisé, composé d'un seul bras d'assistance mécanique, a été expérimenté en laboratoire lors d'une tâche simulée d'assemblage en hauteur OHW (*Over Head Work* : travail au-dessus de la tête) [23]. Les résultats ont mis en évidence les bénéfices apportés par l'usage de ce type d'assistance, d'une part sur la perception de l'effort au niveau des épaules, réduite de plus de 50 % en moyenne et, d'autre part, sur l'activité des muscles de l'épaule, réduite de près d'un tiers en moyenne. Les manifestations de la fatigue musculaire semblaient également moins marquées pour ces muscles dans la situation de travail avec EXO<sub>MS</sub>. Lors de tâches de manutention de charge (soulèvement), les travaux de l'INRS ont également rapporté une diminution significative de l'activité (- 50 % environ) des muscles de l'épaule, élévateur du bras, avec l'usage d'un EXO<sub>MS</sub> non robotisé [25].

Bien que relativement rares, ces résultats arguent ainsi en faveur de l'intérêt de ce type de dispositif dans la prévention des TMS de l'épaule, pour les situations d'OHW, comme pour les tâches de manutention manuelle. En effet, les contraintes exercées par le muscle deltoïde sont connues pour leur implication dans le développement de la douleur, des troubles articulaires, et des lésions tendineuses au niveau de l'épaule.

En revanche, si les sollicitations excessives de l'épaule apparaissent clairement comme un facteur de risque important dans la survenue des tendinopathies de l'épaule, en favorisant un long processus dégénératif, l'origine de la pathologie est également souvent consécutive à un conflit entre les tendons de la coiffe et les os (acromion et tête de l'humérus). Une parfaite coordination des muscles mobilisant cette articulation est alors nécessaire pour ordonner le bon fonctionnement de l'articulation. Or, dans l'étude de l'INRS [25], l'usage de l'EXO<sub>MS</sub> lors de la tâche de soulèvement/abaissement de charges s'était accompagné d'une hausse significative de l'activité du muscle triceps brachial, suggérant de fait une modification de la coordination des muscles de l'épaule.

De plus, il a été rapporté une augmentation de l'activité des muscles lombaires avec l'usage de l'EXO<sub>MS</sub> lors de tâches OWH ou de manipulation de caisses, démontrant ainsi l'impact potentiellement néfaste de l'usage d'un dispositif d'assistance des MS sur la chaîne posturale [23, 25]. Il a également été mis en évidence une hausse de l'activité des muscles mobilisant la cheville lors de tâches réalisées avec EXO<sub>MS'</sub>, suggérant que l'ensemble de la chaîne puisse être affecté [25].

### ► Conséquences sur la posture

Lors d'une précédente étude [24], les opérateurs équipés d'un EXO<sub>MS</sub> unilatéral droit robotisé avaient tendance à accroître les forces d'appui exercées par le pied droit, soulageant alors l'appui controlatéral. Si le poids et l'équilibre (répartition des masses) propres à cet EXO peuvent en partie expliquer ces observations, il est également probable qu'elles témoignent de changements posturaux en réponse à des modifications de l'action menée par le bras. En effet, l'exécution d'une activité de travail ne concerne pas uniquement les segments mobilisés en général (c'est-à-dire la chaîne focale), mais bien l'ensemble du corps. Plusieurs études ont ainsi mis en évidence que la perturbation de l'équilibre induite par l'action était à l'origine d'adaptations posturales ; celles-ci peuvent dépendre de la vitesse du mouvement initié, de la force exigée par celui-ci et de l'inertie du segment mobilisé. En ce sens, il paraît évident que l'usage d'un EXO<sub>MS</sub> peut avoir des conséquences importantes sur les caractéristiques du mouvement. Les récents travaux de l'INRS [25] tendent à confirmer cette dernière hypothèse, puisqu'ils démontrent que les participants équipés de l'EXO<sub>MS</sub> étaient affectés par une augmentation de leurs oscillations posturales (avant-arrière) lors d'une tâche simulée de manutention.

Ainsi, l'usage d'un EXO<sub>MS</sub> pourrait exposer, dans certaines conditions, les opérateurs à des risques musculaires supplémentaires concernant la chaîne posturale (par exemple, des lombalgies), ainsi qu'à des risques d'accidents par perturbation du mouvement (des chutes, par exemple).

### ► Conséquences sur les contraintes articulaires

Récemment, une étude s'est penchée sur un EXO<sub>MS</sub> robotisé unilatéral, assistant les articulations de l'épaule, du coude et du poignet droit, sur 7 degrés de liberté [26], lors d'une tâche OHW consistant à fixer des éléments en hauteur par l'intermédiaire d'une visseuse d'environ 1 kg. Les contraintes articulaires au niveau du membre supérieur (poignet, coude, épaule) avaient été diminuées significativement grâce à l'usage de l'EXO<sub>MS</sub>. La seule exception était apparue lorsque que le niveau d'assistance fourni par l'exosquelette avait été paramétré à son maximum (1,9 kg.m). Il est alors apparu qu'une assistance trop importante pouvait, au contraire, induire une augmentation des contraintes articulaires. Les contraintes au mouvement, potentiellement générées par l'exosquelette, et contre lesquelles les opérateurs auraient à lutter afin de garder la maîtrise de leur geste, pourraient expliquer cette augmentation des contraintes articulaires. Il reste probable que le niveau d'assistance optimal peut être différent d'un sujet à l'autre, et que l'EXO<sub>MS</sub> devrait donc être ajusté idéalement à l'utilisateur (anthropométrie, force...).

Si les résultats de ces études laissent donc entrevoir les bénéfices que pourrait apporter ce type d'EXO<sub>MS</sub> en termes de prévention des sollicitations articulaires de l'épaule, ils font également apparaître quelques précautions à considérer, en particulier quant au niveau optimal d'assistance fourni par ce type de dispositif.

## 3.3 Bilan

Les études ayant évalué l'intérêt des EXO<sub>MS</sub> tendent à démontrer leur efficacité pour atténuer les contraintes musculaires et articulaires à l'épaule, lors de différentes tâches de manutention manuelle. Compte tenu de la rareté de ces études, il est nécessaire de rester prudent avant que d'autres travaux soient entrepris sur le sujet, afin de conforter ces premiers résultats. Les prochaines investigations devront notamment diversifier les protocoles expérimentaux des mesures en situation réelle ou simulée de travail.



En outre, il semble que le fait d'assister l'élévation du MS puisse avoir des répercussions au niveau de la chaîne posturale, dans la genèse de l'action (inertie, force, vitesse, trajectoire), comme dans la régulation de l'équilibre (masse supplémentaire et déplacement du centre de masse). Les conséquences musculaires de ces modifications restent difficiles à appréhender dans leur globalité sans mener d'autres expérimentations. Il est donc indispensable de démontrer, dans chaque cas envisagé, que l'assistance du MS par l'EXO<sub>MS</sub> ne se fait pas au détriment d'une augmentation d'autres contraintes biomécaniques.

Enfin, force est de constater que les travaux menés n'ont finalement apporté que peu de preuves quant à l'intérêt des EXO<sub>MS</sub> dans la prévention des TMS, puisque la seule réduction des efforts générés par les muscles de l'épaule actant pour l'élévation du bras ne suffit pas à démontrer que les structures musculosquelettiques seront préservées par l'usage d'un EXO<sub>MS</sub>. Le maintien de la coordination et de la synchronisation de l'ensemble des muscles ainsi que du comportement biomécanique de l'articulation sont des éléments indispensables à prendre en compte.

# Conclusion

Les principaux enjeux de cette analyse étaient de recenser les preuves disponibles quant au potentiel des exosquelettes à limiter l'exposition des opérateurs aux contraintes biomécaniques associées à leurs tâches professionnelles et, plus largement, de discuter des intérêts et limites de ces systèmes pour prévenir l'occurrence des TMS. Ce travail s'est plus particulièrement intéressé aux mécanismes physiopathologiques des lombalgies et des tendinopathies de l'épaule, affections ciblées par l'usage des exosquelettes industriels contemporains. Cette analyse tend à démontrer que, dans le cadre d'une tâche spécifique (élévation du bras, extension sagittale du tronc), pour laquelle l'usage de l'exosquelette était défini (c'est-à-dire le mouvement et groupe musculaire à soulager), les EXO s'avèrent relativement efficaces pour limiter les contraintes musculaires locales. Il ressort de la majorité des études précédemment citées des baisses de 10 à 60 % du niveau d'activité des muscles mobilisant l'articulation assistée par l'exosquelette, en comparaison d'une même tâche réalisée sans équipement. De ce fait, les conclusions des travaux antérieurs s'accordent, en général, en faveur de l'utilisation de ces nouvelles technologies d'assistance dans le contexte professionnel.

Néanmoins, principalement focalisées sur les efforts musculaires locaux lors de tâches très spécifiques, ces études laissent entrevoir de nombreux manques dans les connaissances établies, en particulier quant aux réponses physiologiques plus globales, liées à l'usage d'un exosquelette.

Par conséquent, même si le potentiel des exosquelettes industriels pour atténuer les contraintes musculaires au niveau du dos ou des membres supérieurs paraît relativement prometteur, l'état actuel des connaissances ne permet pas de conclure formellement à l'efficacité de ce type de technologies pour prévenir la survenue de TMS tels que les lombalgies ou les tendinopathies de l'épaule.

Il convient donc de mener des évaluations rigoureuses de l'interaction homme-exosquelette pour pouvoir intégrer ces équipements dans une situation de travail.



# Bibliographie

- [1] DREISTATDT S., DE FLAUGERGUES S., SERRES N., et YOUSSOUF M. – Rapport charges et produits AT-MP 2017 : éléments statistiques sur les lombalgies. CNAM - DRP, 2016
- [2] AUBLET-CUVELIER A., GAUDEZ C., et CAIL F. – Troubles musculosquelettiques des membres supérieurs d'origine professionnelle. EMC-Pathologie professionnelle et de l'environnement, 2015, 10(3): pp. 1-10
- [3] NIOSH – Musculoskeletal disorders and workplace factors: a critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back, 1997
- [4] EUROFOUND – Fifth European Working Conditions Survey, 2012
- [5] CNAMTS – Rapport de gestion, 2014
- [6] DE LOOZE M.P., BOSCH T., KRAUSE F., STADLER K.S., et O'SULLIVAN L.W. – Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. Ergonomics, 2016, 59(5): pp. 671-681
- [7] BURDORF A. et SOROCK G. – Positive and negative evidence of risk factors for back disorders. Scand J Work Environ Health, 1997, 23(4): pp. 243-56
- [8] HOOGENDOORN W.E., VAN POPPEL M.N.M., BONGERS P.M., KOES B.W., et BOUTER L.M. – Physical load during work and leisure time as risk factors for back pain. Scandinavian Journal of Work Environment & Health, 1999, 25(5): pp. 387-403
- [9] CALLAGHAN J.P. et MCGILL S.M. – Intervertebral disc herniation: studies on a porcine model exposed to highly repetitive flexion/extension motion with compressive force. Clin Biomech, 2001, 16(1): pp. 28-37
- [10] WADDELL G. – The back Pain revolution, 1998
- [11] ABDOLI E.M., AGNEW M.J., et STEVENSON J.M. – An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. Clin Biomech, 2006, 21(5): pp. 456-65
- [12] ABDOLI E.M. et STEVENSON J.M. – The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. Clin Biomech, 2008, 23(3): pp. 372-80
- [13] FROST D.M., ABDOLI E.M., et STEVENSON J.M. – PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. J Electromyogr Kinesiol, 2009, 19(6): pp. 403-12
- [14] WHITFIELD B.H., COSTIGAN P.A., STEVENSON J.M., et SMALLMAN C.L. – Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. International Journal of Industrial Ergonomics, 2014, 44(1): pp. 39-44

- [15] KOBAYASHI H., AIDA T., et HASHIMOTO T. – Muscle Suit Development and Factory Application. *International Journal of Automation Technology*, 2009, 3(6): pp. 709-715
- [16] KOBAYASHI H. et NOZAKI H. – Development of Support System for Forward Tilting of the Upper Body. 2008 International Conference on Mechatronics and Automation: (Icma), 2008, Vols 1 and 2: pp. 351-355
- [17] GODWIN A.A., STEVENSON J.M., AGNEW M.J., TWIDDY A.L., ABDOL-ERAMAKI M., et LOTZ C.A. – Testing the efficacy of an ergonomic lifting aid at diminishing muscular fatigue in women over a prolonged period of lifting. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2009, 39(1): pp. 121-126
- [18] LOTZ C.A., AGNEW M.J., GODWIN A.A., et STEVENSON J.M. – The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *J Electromyogr Kinesiol*, 2009, 19(2): pp. 331-40
- [19] GRAHAM R.B., AGNEW M.J., et STEVENSON J.M. – 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): pp. 936-942
- [20] ULREY B.L. et FATHALLAH F.A. – Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. *J Electromyogr Kinesiol*, 2013, 23(1): pp. 206-15
- [21] BOSCH T., VAN ECK J., KNITEL K., et DE LOOZE M. – The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon*, 2016, 54: pp. 212-7
- [22] CAGNIE B., DHOOGHE F., VAN AKELEYEN J., COOLS A., CAMBIER D., et DANNEELS L. – Changes in microcirculation of the trapezius muscle during a prolonged computer task. *Eur J Appl Physiol*, 2012, 112(9): pp. 3305-12
- [23] RASHEDI E., KIM S., NUSSBAUM M.A., et AGNEW M.J. – Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 2014, 57(12): pp. 1864-74
- [24] SYLLA N., BONNET V., COLLEDANI F., et FRAISSE P. – Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, 44(4): pp. 475-481
- [25] THEUREL J., DESBROSSES K., ROUX T., et SAVESCU A. – Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Appl Ergon*, 2018, 67: pp. 211-217
- [26] GARREC P., FRICONNEAU J.P., MEASSON Y., et PERROT Y. – ABLE, an Innovative Transparent Exoskeleton for the Upper-Limb. 2008 IEEE/RSJ International Conference on Robots and Intelligent Systems, Conference Proceedings, 2008, Vols 1-3: pp. 1483-1488

Pour commander les brochures et les affiches de l'INRS,  
adressez-vous au service Prévention de votre Carsat, Cram ou CGSS.

## Services Prévention des Carsat et Cram

### **Carsat ALSACE-MOSELLE**

(67 Bas-Rhin)  
14, rue Adolphe-Seyboth  
CS 10392  
67010 Strasbourg cedex  
tél. 03 88 14 33 00 – fax 03 88 23 54 13  
prevention.documentation@carsat-am.fr  
www.carsat-alsacemoselle.fr

### (57 Moselle)

3, place du Roi-George  
BP 31062  
57036 Metz cedex 1  
tél. 03 87 66 86 22 – fax 03 87 55 98 65  
www.carsat-alsacemoselle.fr

### (68 Haut-Rhin)

11, avenue De-Lattre-de-Tassigny  
BP 70488  
68018 Colmar cedex  
tél. 03 69 45 10 12 – fax 03 89 21 62 21  
www.carsat-alsacemoselle.fr

### **Carsat AQUITAINE**

(24 Dordogne, 33 Gironde, 40 Landes,  
47 Lot-et-Garonne, 64 Pyrénées-Atlantiques)  
80, avenue de la Jallère  
33053 Bordeaux cedex  
tél. 05 56 11 64 36  
documentation.prevention@carsat-aquitaine.fr  
www.carsat-aquitaine.fr

### **Carsat AUVERGNE**

(03 Allier, 15 Cantal, 43 Haute-Loire,  
63 Puy-de-Dôme)  
Espace Entreprises  
Clermont République  
63036 Clermont-Ferrand cedex 9  
tél. 04 73 42 70 19 – fax 04 73 42 70 15  
offredoc@carsat-auvergne.fr  
www.carsat-auvergne.fr

### **Carsat BOURGOGNE - FRANCHE-COMTÉ**

(21 Côte-d'Or, 25 Doubs, 39 Jura,  
58 Nièvre, 70 Haute-Saône,  
71 Saône-et-Loire, 89 Yonne,  
90 Territoire de Belfort)  
46, rue Elsa-Triolet  
21044 Dijon cedex  
tél. 03 80 33 13 92 – fax 03 80 33 19 62  
documentation.prevention@carsat-bfc.fr  
www.carsat-bfc.fr

### **Carsat BRETAGNE**

(22 Côtes-d'Armor, 29 Finistère,  
35 Ille-et-Vilaine, 56 Morbihan)  
236, rue de Châteaugiron  
35030 Rennes cedex 09  
tél. 02 99 26 74 63 – fax 02 99 26 70 48  
drp.cdi@carsat-bretagne.fr  
www.carsat-bretagne.fr

### **Carsat CENTRE - VAL DE LOIRE**

(18 Cher, 28 Eure-et-Loir, 36 Indre,  
37 Indre-et-Loire, 41 Loir-et-Cher, 45 Loiret)  
36, rue Xaintrailles  
CS44406  
45044 Orléans cedex 1  
tél. 02 38 79 70 21  
prev@carsat-centre.fr  
www.carsat-cvl.fr

### **Carsat CENTRE-OUEST**

(16 Charente, 17 Charente-Maritime,  
19 Corrèze, 23 Creuse, 79 Deux-Sèvres,  
86 Vienne, 87 Haute-Vienne)  
37, avenue du Président-René-Coty  
87048 Limoges cedex  
tél. 05 55 45 39 04 – fax 05 55 45 71 45  
cirp@carsat-centreouest.fr  
www.carsat-centreouest.fr

### **Cram ÎLE-DE-FRANCE**

(75 Paris, 77 Seine-et-Marne, 78 Yvelines,  
91 Essonne, 92 Hauts-de-Seine, 93 Seine-Saint-Denis,  
94 Val-de-Marne, 95 Val-d'Oise)  
17-19, place de l'Argonne  
75019 Paris  
tél. 01 40 05 32 64 – fax 01 40 05 38 84  
demande.de.doc.inrs@cramif.cnamts.fr  
www.cramif.fr

### **Carsat LANGUEDOC-ROUSSILLON**

(11 Aude, 30 Gard, 34 Hérault, 48 Lozère,  
66 Pyrénées-Orientales)  
29, cours Gambetta  
34068 Montpellier cedex 2  
tél. 04 67 12 95 55 – fax 04 67 12 95 56  
prevdoc@carsat-lr.fr  
www.carsat-lr.fr

### **Carsat MIDI-PYRÉNÉES**

(09 Ariège, 12 Aveyron, 31 Haute-Garonne, 32 Gers,  
46 Lot, 65 Hautes-Pyrénées, 81 Tarn, 82 Tarn-et-Garonne)  
2, rue Georges-Vivent  
31065 Toulouse cedex 9  
tél. 36 79 – fax 05 62 14 88 24  
doc.prev@carsat-mp.fr  
www.carsat-mp.fr

### **Carsat NORD-EST**

(08 Ardennes, 10 Aube, 51 Marne, 52 Haute-Marne, 54 Meurthe-et-Moselle, 55 Meuse, 88 Vosges)  
81 à 85 rue de Metz  
54073 Nancy cedex  
tél. 03 83 34 49 02 – fax 03 83 34 48 70  
documentation.prevention@carsat-nordest.fr  
www.carsat-nordest.fr

### **Carsat NORD-PICARDIE**

(02 Aisne, 59 Nord, 60 Oise, 62 Pas-de-Calais, 80 Somme)  
11 allée Vauban  
59662 Villeneuve-d'Ascq cedex  
tél. 03 20 05 60 28 – fax 03 20 05 79 30  
bedprevention@carsat-nordpicardie.fr  
www.carsat-nordpicardie.fr

### **Carsat NORMANDIE**

(14 Calvados, 27 Eure, 50 Manche, 61 Orne, 76 Seine-Maritime)  
Avenue du Grand-Cours, 2022 X  
76028 Rouen cedex  
tél. 02 35 03 58 22 – fax 02 35 03 60 76  
prevention@carsat-normandie.fr  
www.carsat-normandie.fr

### **Carsat PAYS DE LA LOIRE**

(44 Loire-Atlantique, 49 Maine-et-Loire, 53 Mayenne, 72 Sarthe, 85 Vendée)  
2 place de Bretagne  
44932 Nantes cedex 9  
tél. 02 51 72 84 08 – fax 02 51 82 31 62  
documentation.rp@carsat-pl.fr  
www.carsat-pl.fr

### **Carsat RHÔNE-ALPES**

(01 Ain, 07 Ardèche, 26 Drôme, 38 Isère, 42 Loire, 69 Rhône, 73 Savoie, 74 Haute-Savoie)  
26 rue d'Aubigny  
69436 Lyon cedex 3  
tél. 04 72 91 97 92 – fax 04 72 91 98 55  
preventionrp@carsat-ra.fr  
www.carsat-ra.fr

### **Carsat SUD-EST**

(04 Alpes-de-Haute-Provence, 05 Hautes-Alpes, 06 Alpes-Maritimes, 13 Bouches-du-Rhône, 2A Corse Sud, 2B Haute-Corse, 83 Var, 84 Vaucluse)  
35 rue George  
13386 Marseille cedex 5  
tél. 04 91 85 85 36 – fax 04 91 85 75 66  
documentation.prevention@carsat-sudest.fr  
www.carsat-sudest.fr

## **Services Prévention des CGSS**

### **CGSS GUADELOUPE**

DRPPS Service prévention,  
Espace Amédée Fengarol,  
Parc d'activités La Providence,  
ZAC de Dothémare  
97139 Les Abymes  
BP 486, 97159 Pointe à Pitre cedex  
tél. 05 90 21 46 00 – fax 05 90 21 46 13  
risques.professionnels@cgss-guadeloupe.cnamts.fr

### **CGSS GUYANE**

Direction des risques professionnels  
CS 37015  
97307 Cayenne cedex  
tél. 05 94 29 83 04 – fax 05 94 29 83 01  
prevention-rp@cgss-guyane.fr

### **CGSS LA RÉUNION**

4 boulevard Doret  
CS 53001  
97741 Saint-Denis cedex 9  
tél. 02 62 90 47 00 – fax 02 62 90 47 01  
prevention@cgss-reunion.fr

### **CGSS MARTINIQUE**

Quartier Place-d'Armes  
97210 Lamentin cedex 2  
tél. 05 96 66 51 31 et 05 96 66 51 32  
fax 05 96 51 81 54  
prevention972@cgss-martinique.fr  
www.cgss-martinique.fr

Ce guide, destiné aux préventeurs, fait le point des connaissances actuelles sur les exosquelettes afin de mettre en évidence les intérêts et les limites de leur usage en matière de prévention des troubles musculosquelettiques (TMS). L'objectif est d'aider à mieux appréhender l'impact des exosquelettes pour accompagner efficacement l'entreprise dans sa démarche d'acquisition et d'intégration d'un exosquelette.



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 6311**

1<sup>re</sup> édition • octobre 2018 • ISBN 978-2-7389-2405-6

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

[www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

