

## Notes techniques

# USAGE D'UN EXOSQUELETTE D'ASSISTANCE DES BRAS: BÉNÉFICES ET CONTRAINTES LORS DE TÂCHES DE MANUTENTION

Une étude a été menée par l'INRS dans le but d'étudier les conséquences physiologiques de l'utilisation d'un exosquelette d'assistance du membre supérieur lors de tâches de manutention manuelle. Elle s'inscrit dans l'accompagnement méthodologique et métrologique d'une entreprise ayant initié un projet d'évaluation de cette technologie, acquise afin de prévenir les risques de troubles musculosquelettiques (TMS) chez ses salariés. Les résultats, présentés dans cet article, mettent en lumière les avantages et les limites de l'usage d'un exosquelette en fonction de la situation de travail.

---

JEAN  
THEUREL,  
KÉVIN  
DESBROSSES  
INRS,  
département  
Homme au  
travail

---

**E**n dépit du développement de l'automatisation et de la mécanisation, certaines tâches de manutention manuelle restent aujourd'hui durablement ancrées dans de nombreuses situations de travail. Or, celles-ci sont connues pour exposer les travailleurs concernés à des contraintes biomécaniques importantes, facteurs de risque de survenue de troubles musculosquelettiques (TMS) [1]. Afin de limiter la prévalence de ces TMS, les entreprises expérimentent aujourd'hui de nouvelles approches préventives, comme l'usage d'exosquelettes [2]. Appliqués à un usage professionnel, ces nouveaux équipements peuvent être définis comme des structures externes, revêtues par l'opérateur, conçues pour apporter une assistance physique dans la réalisation d'une tâche. Du fait de la diversité des besoins applicatifs, ces nouvelles technologies d'assistance physique se sont développées sous des formes extrêmement variées. Les exosquelettes peuvent être considérés:

- soit comme des robots d'assistance physique (RAP), lorsque l'assistance provient de moteurs électriques ou de systèmes hydrauliques asservis à la détection des mouvements du corps;
- soit comme des dispositifs d'assistance physique (DAP), lorsque l'assistance provient d'une restitution de l'énergie mécanique stockée par des systèmes à ressorts ou élastiques [3].

Certains modèles d'exosquelettes ont été calqués sur les caractéristiques du corps humain, alors que

d'autres sont pourvus d'une architecture fonctionnelle spécifique [4]. Le nombre d'articulations mobilisées, ainsi que le nombre de degrés de liberté par articulation, sont également très variables selon les systèmes. Les exosquelettes se différencient également en fonction de la partie du corps qu'ils visent à assister: membres supérieurs, dos, membres inférieurs ou corps entier [2].

Dans ce contexte, l'acquisition d'un exosquelette susceptible d'apporter une réponse adaptée aux contraintes physiques spécifiques auxquelles les salariés sont exposés dans chaque situation de travail requiert l'évaluation préalable de la situation de travail et de l'interaction homme-exosquelette [3].

### Exemple d'une entreprise (secteur de l'énergie)

Une entreprise a envisagé, en 2016, l'acquisition d'un exosquelette afin de vérifier si cette solution pouvait être appropriée pour soulager physiquement certains manutentionnaires. Confrontés à la nécessité d'installer et de désinstaller des chantiers mobiles pour la maintenance des différents sites de production de leur entreprise, les opérateurs devaient en effet effectuer de nombreuses manipulations de charges. À court de solutions de prévention pour améliorer efficacement cet environnement de travail (organisation, situation, aménagement collectif...), l'entreprise a alors fait le choix d'acquérir un exosquelette de la marque Exhau, conçu pour réduire la charge physique

## RÉSUMÉ

Les tâches de manutention manuelle sont connues pour être associées à des contraintes biomécaniques importantes et ainsi, à un risque accru de développement de troubles musculo-squelettiques (TMS). Une étude a donc été menée par l'INRS, afin d'évaluer les conséquences physiologiques de l'utilisation d'un exosquelette d'assistance du

membre supérieur lors de ce type d'opérations. Les participants ont réalisé trois tâches caractéristiques de manipulation de caisses, lors d'épreuves standardisées (soulèvement - abaissement de charges) ou imposant une rotation du buste, ainsi que lors d'une épreuve de marche avec port de charge. Pour l'ensemble des tâches,

bien que permettant une réduction significative de l'activité des muscles fléchisseurs de l'épaule, l'utilisation de l'exosquelette semble avoir des conséquences physiologiques plus globales, en particulier sur l'activité des muscles posturaux, ainsi que sur l'effort cardiovasculaire.

### *Use of an upper body exoskeleton: benefits and constraints during handling operations*

*Manual handling tasks are known to be associated with major biomechanical constraints, and therefore, an increased risk of development of musculoskeletal disorders (MSDs). A study was therefore conducted by INRS to assess the physiological consequences of the use*

*of an upper body exoskeleton during these types of operations. Participants performed three tasks characteristic of box handling, during standardised tests (raising/lifting loads), activities requiring torso rotation, as well as walking while carrying a load.*

*For all of the tasks, although the exoskeleton enabled a significant reduction in shoulder flexor activity, its use seems to have more global physiological consequences, in particular on the activity of postural muscles, and on cardiovascular effort.*

des membres supérieurs. L'entreprise a demandé l'assistance de l'INRS pour mieux comprendre les bénéfices et limites d'un tel système, dans l'objectif de mieux prévenir les contraintes biomécaniques auxquelles étaient exposés ses salariés. En effet, si quelques études ont démontré les bénéfices apportés par l'usage d'exosquelettes d'assistance du dos pour réduire les sollicitations [5] et la fatigue des muscles lombaires [6, 7] ainsi que les contraintes appliquées sur la colonne vertébrale [8, 9] au cours de tâches de manutention, très peu d'informations sont disponibles quant aux conséquences physiologiques de l'usage d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs lors de ce même type de tâche. Il semble que ce type d'exosquelette ait été évalué uniquement lors de tâches spécifiques nécessitant le maintien des bras en hauteur, au-dessus de la tête [10]. Les premiers résultats tendaient à démontrer le potentiel des exosquelettes dans cette situation pour diminuer l'effort localement perçu, la sollicitation des muscles élévateurs du bras, et les contraintes articulaires des membres supérieurs [10]. Il était donc pertinent pour l'entreprise de s'interroger quant à l'impact de ce dispositif lors de tâches de manutention de nature différente (soulèvement, rangement et transport de charges).

### Démarche d'évaluation

L'INRS a accompagné cette entreprise dans une démarche d'évaluation des conséquences physiologiques de l'usage d'un exosquelette d'assistance des épaules, au cours de tâches classiquement opérées par les manutentionnaires de l'entreprise. Il était en

effet essentiel, d'une part, d'objectiver les effets liés au port de l'exosquelette et, d'autre part, de s'assurer que si des effets bénéfiques étaient observés, ils n'étaient pas accompagnés de nouvelles contraintes biomécaniques pour les salariés. Des études antérieures ont en effet démontré que l'utilisation de technologies similaires pouvait perturber la posture et les mouvements [10]. Il était de ce fait supposé que ces nouvelles contraintes, associées au poids de l'exosquelette, pouvaient induire une augmentation de la sollicitation cardiovasculaire.

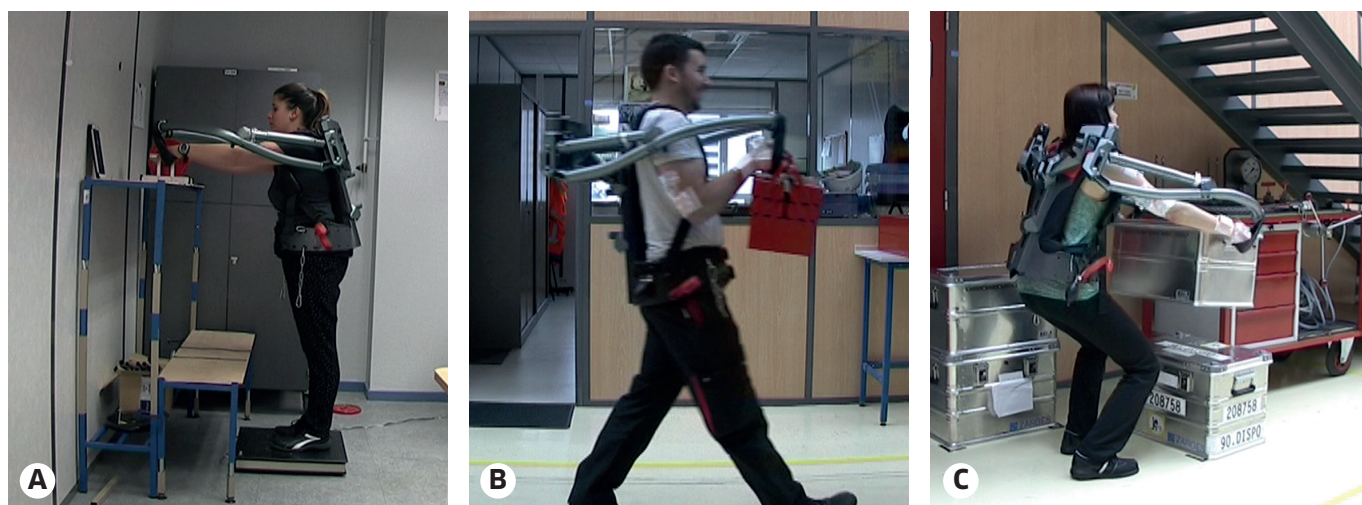
### Les participants

Huit salariés de l'entreprise (quatre hommes et quatre femmes) se sont portés volontaires pour tester l'exosquelette et participer aux mesures conduites par l'INRS. Leur activité habituelle de travail était composée de phases de manutention manuelle (caisses de transport, boîtes à outils...). Chaque participant a préalablement rencontré le médecin du travail, afin de s'assurer de l'absence de contre-indication au port de l'exosquelette et à la réalisation du protocole de mesure, validé par le CHSCT et l'équipe médicale. Afin de familiariser les participants aux tâches expérimentales et à l'utilisation de l'exosquelette, tous ont réalisé quatre séances d'entraînement, sur une durée totale moyenne d'environ 1h30.

### L'exosquelette

L'exosquelette testé était le modèle Stronger® (Exhaus), permettant d'assister l'élévation des membres supérieurs. Il est composé de deux bras mécaniques, activés par des ressorts et fixés à





© J. Thuerel / K. Desbrosses / INRS

↑ **FIGURE 1**  
L'exosquelette et les trois tâches expérimentales: A) manipulation de charge standardisée (STAND) ; B) marche avec port d'une caisse à outils (MARCHE) et C) manipulation de caisses avec rotation du tronc (ROTAT).

une veste rigide, avec des articulations permettant des mouvements dans les trois dimensions (Cf. Figure 1). L'extrémité des bras mécaniques possède des sangles permettant de loger les mains de l'utilisateur. Son poids est de 9 kg et le niveau d'assistance peut être ajusté au niveau des ressorts. Dans le cadre du protocole de mesure, le système a été réglé pour obtenir, à l'extrémité de chaque bras mécanique, une assistance d'environ 9 kg pour les hommes et 5 kg pour les femmes (pour une position de 90° d'élévation des bras). Ces valeurs sont à mettre en relation avec les charges soulevées dans les tâches expérimentales. Avant la réalisation des mesures, l'exosquelette a été ajusté aux caractéristiques anthropométriques de chaque participant.

### Les tâches expérimentales

Chaque participant a réalisé trois tâches de maintenance, selon deux conditions, avec (notée « AVEC ») et sans (notée « SANS ») l'utilisation de l'exosquelette, dans un ordre aléatoire. Ces tâches consistaient en :

- une manipulation de charge standardisée (notée « STAND »): lors de cette tâche, les participants doivent déplacer une charge (9 kg pour les hommes et 5 kg pour les femmes) d'une étagère située à hauteur des genoux à une étagère située à hauteur des épaules, toutes deux placées face aux opérateurs (Cf. Figure 1, A). L'exercice dure trois minutes, à un rythme imposé par un signal sonore (10 cycles/minute);
- une marche avec port d'une caisse à outils (notée « MARCHE »): lors de cette tâche, les participants se déplacent en marchant sur une distance de 30 mètres à allure libre, en portant à deux mains une caisse à outils (15 kg pour les hommes et 8 kg pour les femmes. Cf. Figure 1, B);
- une manipulation de caisses avec une rotation du tronc (notée « ROTAT »): cette tâche consiste en l'empilement et au dépilement de quatre caisses (dimensions ≈ 80 cm de large et 35 cm de haut; 15 kg pour les hommes et 8 kg pour les femmes)

avec une rotation de 90° du tronc (Cf. Figure 1, C). Le rythme est librement choisi selon la consigne.

### Les paramètres évalués

#### → L'activité musculaire

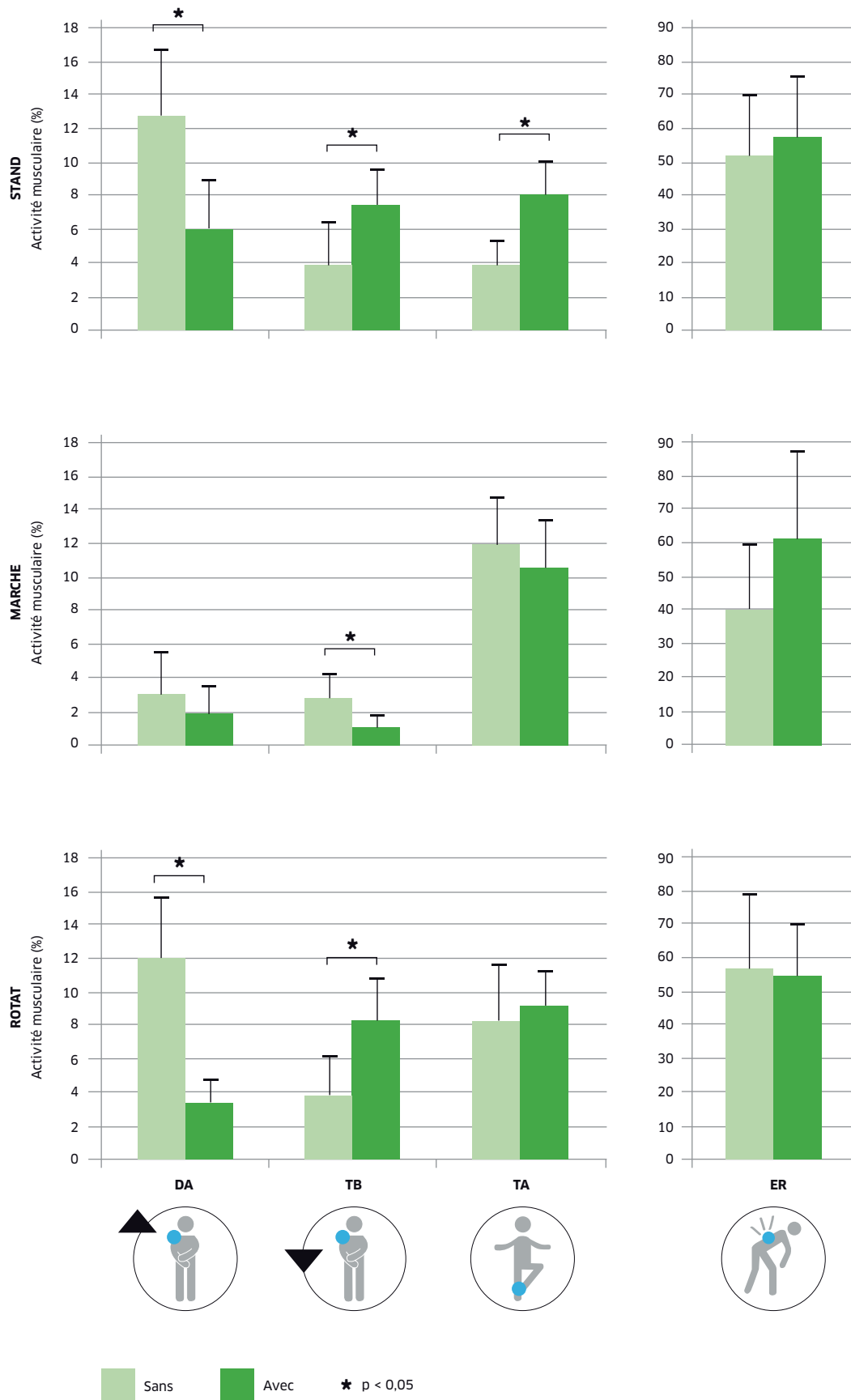
L'activité électrique musculaire permet traditionnellement d'évaluer le niveau de sollicitation d'un muscle. Elle a ici été enregistrée au moyen de la technique d'électromyographie de surface (EMG), d'une part, pour les muscles du membre supérieur, tels que le muscle deltoïde antérieur (DA), contribuant à l'élévation du bras, et le muscle triceps brachial (TB, chef long), intervenant à l'inverse dans l'abaissement du bras et l'extension du coude et, d'autre part, pour les muscles posturaux tels que les muscles érecteurs du rachis (ER, lombaire), intervenant dans le redressement et la stabilisation du tronc, et tibial antérieur (TA), mobilisant la cheville et jouant un rôle essentiel dans le contrôle de l'équilibre. Les valeurs présentées sont exprimées en pourcentage de l'activité maximale du muscle considéré.

#### → La régulation de l'équilibre

Lors de la tâche de maintenance standardisée, une plateforme de posturographie a été positionnée sous les pieds des participants, afin d'évaluer le déplacement du centre des pressions (oscillation), représentatif de la régulation de l'équilibre postural. La surface du déplacement et l'amplitude sur l'axe antéro-postérieur ont été analysées.

#### → L'activité cardiaque

Les tâches de maintenance manuelle peuvent être associées à des sollicitations excessives sur le plan cardiovasculaire. Or, compte tenu de la masse additionnelle que représente le port d'un exosquelette (9 kg pour le modèle testé) et des contraintes gestuelles que celui-ci pourrait occasionner, il était supposé que le fait de revêtir ce type de dispositif pouvait être à l'origine d'une augmentation accrue des sollicitations cardiaques au cours de tâches de



↑FIGURE 2 Activités musculaires au cours des trois tâches : STAND, MARCHÉ et ROTAT. Niveaux de sollicitation (en %) des muscles deltoïdes antérieurs (DA), contribuant à l'élevation du bras, triceps brachiaux (TB), contribuant à l'abaissement du bras, tibials antérieurs (TA), contribuant à l'équilibre, et érecteur du rachis (ER), contribuant au redressement et à la stabilisation du tronc. La condition SANS exosquelette est représentée en vert clair et celle AVEC exosquelette en vert foncé



manutention. La fréquence cardiaque a donc été enregistrée en continu durant l'ensemble du protocole. Avant chaque condition (avec et sans exosquelette), une période de repos en position assise, d'une durée de cinq minutes, a été effectuée pour déterminer une fréquence cardiaque de repos. Le coût cardiaque (CC) a été obtenu en soustrayant la fréquence de repos à la fréquence moyenne de travail.

→ **La perception de l'effort**

L'effort perçu a été évalué au moyen de l'échelle RPE (*Rating of Perceived Exertion*), cotée de 6 à 20 [11]; les participants ont été interrogés à la fin de chaque tâche et de chaque conditions (avec et sans exosquelette).

**Les analyses statistiques**

Toutes les données enregistrées (activité musculaire, coût cardiaque relatif, oscillations posturales et perception d'effort) au cours de cette étude ont été analysées en utilisant un modèle linéaire général. Le seuil de significativité a été fixé à 5% ( $p < 0,05$ ), c'est-à-dire que la probabilité d'un résultat similaire dans une population semblable est estimée supérieure à 95%. Les valeurs présentées sont les moyennes des huit participants  $\pm$  les écart-types.

**Résultats**

**Conséquences sur les sollicitations musculaires du membre supérieur**

L'utilisation de l'exosquelette au cours des tâches de manutention, standardisée et avec rotation, s'accompagne d'une baisse significative de l'activité du muscle DA (Cf. Figure 2). L'amplitude de la réduction est respectivement de 54% pour STAND et de 73% pour ROTAT, en comparaison des mêmes tâches réalisées sans équipement. Le principe de fonctionnement du dispositif d'assistance testé est de faciliter l'élévation du bras, mouvement pour lequel le muscle DA est particulièrement sollicité. Les tâches de manutention examinées semblent donc particulièrement propices pour entrevoir les bénéfices apportés par l'usage de l'exosquelette sur l'activité des muscles deltoïdes.

En revanche, l'utilisation de l'exosquelette n'a pas d'effet significatif sur le niveau de sollicitation du muscle DA au cours de la tâche de marche (Cf. Figure 2). Les mesures réalisées avec l'EMG mettent en évidence que ce muscle n'est que très faiblement actif (i.e., 3% de son activité maximale) lors des deux conditions expérimentales, avec et sans équipement. L'observation des participants suggère que lors de cette tâche de marche, les muscles fléchisseurs du coude contribuent davantage au port de la charge que les muscles de l'épaule. On est alors amené à formuler l'hypothèse que l'apport de l'exosquelette, en termes de réduction des sollicitations musculaires, est principalement localisé au niveau

des muscles fléchisseurs du coude et non au niveau des muscles fléchisseurs de l'épaule. L'assistance fournie par ce type d'exosquelette serait « fonctionnelle », c'est-à-dire dépendante du mouvement effectué (par exemple: élévation du bras dans le plan sagittal) et non d'une articulation spécifique (ex.: l'épaule). Les groupes musculaires assistés par ce dispositif seraient donc dépendants du mouvement à effectuer.

Au-delà des conséquences sur l'activité des muscles ciblés, il est également supposé que l'usage d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs peut avoir des conséquences négatives sur les muscles abaisseurs du bras, comme le muscle TB. Les tâches étudiées ici comprennent en effet des phases d'élévation puis d'abaissement des bras. Or, la conception même de l'exosquelette étudié implique que l'énergie potentielle soit stockée dans un élément ressort lors de l'abaissement des bras, pour être ensuite restituée lors de l'élévation des bras. Les résultats confirment que l'activité du muscle TB au cours des tâches de manutention, STAND et ROTAT, a en moyenne augmenté de 95% et 116%, respectivement, avec l'usage de l'exosquelette (Cf. Figure 2). À l'inverse, dans le cas de tâches plus spécifiques, où les bras sont uniquement maintenus en élévations (travail sous caisse, ponçage de plafond, etc.), sans abaissement des bras, l'utilisation de l'exosquelette n'aurait aucune conséquence négative sur l'activité musculaire [12]. Lors de telles tâches, dites « Over-Head-Work » (OHW), l'activité du muscle TB est même réduite d'environ 40%, lors de précédentes études [12]. Le muscle TB contribue en effet à l'extension du coude dans ce dernier cas de figure et donc, à l'élévation des mains.

Ces dernières observations confirment donc que les exosquelettes prodiguent une aide « fonctionnelle » (i.e., mouvement-dépendante) et non spécifique à un groupe musculaire. La réduction significative de l'activité du TB lors de la tâche de marche réalisé avec exosquelette va également dans ce sens. Le poids de la caisse à outils, maintenue devant les participants, suffit à contraindre les ressorts. Ces derniers assurent probablement un rôle d'amortissement des à-coups liés à la marche et ainsi, limitent la sollicitation du muscle TB dans le contrôle de la stabilité de l'articulation du coude.

**Conséquences sur l'équilibre et l'activité des muscles posturaux**

Par ailleurs, il était également supposé que, du fait des impacts potentiels de l'exosquelette sur la transmission des efforts, l'inertie des mouvements ou encore la répartition des masses, l'usage de cette technologie pourrait avoir des conséquences non négligeables sur la posture et son contrôle, au cours d'activités de manutention. En effet, il a été précédemment démontré, au cours d'une tâche simulée

TÂCHE	STAND		MARCHE		ROTAT	
	SANS	AVEC	SANS	AVEC	SANS	AVEC
Exosquelette						
Temps (s)			14.0 ± 1.2	14.7 ± 1.1	36.9 ± 6.7	47.6 ± 7.1 *
CC (bpm)	52.1 ± 5.4	59.3 ± 8.2	49.3 ± 9.7	46.0 ± 4.5	66.6 ± 5.2	67.0 ± 7.4
RPE (u.a.)	13.4 ± 1.1	12.9 ± 1.4	13.6 ± 1.5	11.2 ± 2.2 *	13.3 ± 1.2	12.8 ± 1.7

↑ **TABLEAU 1** Durée de la tâche, coût cardiaque et effort perçu. La durée mesurée pour les tâches effectuées à cadence libre correspond à la réalisation de deux cycles pour ROTAT et de 20 m pour MARCHE. Le coût cardiaque (CC) est exprimé en battements par minute (bpm) et le niveau d'effort perçu (RPE) en unité arbitraire (u.a., de 6 à 20). \*  $p < 0,05$ .

de vissage en hauteur (OHV), que l'usage d'un exosquelette d'assistance du bras peut avoir des conséquences sur les stratégies posturales. Ainsi, une analyse des forces de réaction au sol a révélé que les opérateurs ont tendance à accentuer les forces d'appui sous le bras assisté et à davantage fléchir le buste vers l'avant au cours de la tâche réalisée avec exosquelette [10].

Ici, lors de la tâche de manutention standardisée, les mesures posturologiques démontrent une hausse significative des oscillations ( $\approx 68\%$ ) des opérateurs lorsque ceux-ci utilisent l'exosquelette. L'activité du muscle TA, stabilisateur de la cheville, est également significativement augmentée (Cf. Figure 2), ce qui témoigne aussi de contraintes posturales accrues.

Cela va dans le sens des précédents travaux qui ont déjà mis en lumière une augmentation des contraintes posturales avec l'usage d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs, lors d'une tâche avec les bras en hauteur [12]. La hausse de l'activité des muscles érecteurs du rachis (+ 31% à + 88%, en fonction de la charge manipulée) en a été le témoin. Les auteurs de ces travaux ont suggéré que ces résultats seraient en grande partie dus à un déséquilibre de l'exosquelette qui, dans ce cas, n'offre qu'une assistance unilatérale. Dans la présente étude, l'activité des muscles ER n'est pas significativement affectée par l'usage de l'exosquelette au cours des tâches de manutention, bien qu'une tendance statistique ( $p = 0,08$ ) soit constatée en ce sens, au cours de la tâche de marche (+ 55%) (Cf. Figure 2). Contrairement aux précédents travaux, l'exosquelette étudié ici dispose d'une assistance bilatérale et semble donc ne pas contraindre le dos de façon asymétrique. En revanche, le port de cet équipement s'accompagne d'une extension accrue des bras lors de la tâche de marche ce qui, par une augmentation du bras de levier des forces (masse manipulée x distance main-torse), pourrait être à l'origine de cette sollicitation plus importante des muscles ER. Si ce résultat n'a pas pu être statistiquement vérifié ici, il semble nécessaire de poursuivre les investigations afin d'éliminer les doutes à ce sujet. En effet, il convient de s'assurer, avant toute utilisation d'un exosquelette au cours de tâches de manutention, que cet équipement n'est pas à l'origine de

contraintes accrues pour les muscles du dos, alors que ceux-ci sont connus pour être déjà particulièrement sollicités au cours de ce type d'effort.

### Conséquences sur l'intensité globale du travail

Les résultats des mesures de fréquence cardiaque montrent que le coût cardiaque (CC) moyen augmente d'environ 14% au cours de la tâche de manutention standardisée lorsque les opérateurs sont équipés de l'exosquelette (Cf. Tableau 1). Les hypothèses soulevées initialement semblent donc avoir été vérifiées. À l'inverse, le CC moyen s'est avéré similaire pour les deux conditions expérimentales, avec et sans équipement, lors de la tâche de manutention en rotation (Cf. Tableau 1). Lors de STAND, la cadence de travail est imposée, et similaire avec et sans exosquelette. À l'inverse, lors de ROTAT, la cadence de travail est libre, et l'absence d'augmentation de l'effort cardiaque pourrait être le corollaire d'une réduction de l'intensité de la tâche (i.e., diminution de la cadence de manipulation des caisses) avec l'utilisation de l'exosquelette. En effet, la durée de la tâche ROTAT s'avère en moyenne 30% supérieure dans la condition avec exosquelette, en comparaison avec la condition sans équipement (Cf. Tableau 1).

Enfin, il n'est constaté aucune influence du port de l'exosquelette sur la fréquence cardiaque lors de l'activité de marche (Cf. Tableau 1), alors que la masse de l'opérateur a été augmentée par l'équipement. Or, les conséquences néfastes de la masse transportée sur le coût énergétique de la locomotion sont connues [13]. Lors de la marche, il peut donc être légitimement supposé que l'assistance apportée aux muscles des membres supérieurs par l'exosquelette est suffisante pour contrebalancer les effets négatifs de la masse supplémentaire induite par cet équipement sur les sollicitations cardiaques. Il n'est en effet observé aucun changement dans la vitesse de marche entre ces deux conditions expérimentales.

### Conséquences sur la perception de l'effort

Les précédents résultats tendent à démontrer que l'usage d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs lors de tâches avec maintien des bras en hauteur s'accompagne de conséquences



physiologiques globales, bénéfiques ou non sur l'effort des opérateurs. Il paraît donc particulièrement intéressant d'interroger les utilisateurs quant à leur perception de l'effort physique global, avec et sans équipement, dans les tâches de maintenance proposées. Contrairement à ce qui aurait pu être envisagé, les participants n'ont pas déclaré de différence significative dans leur perception de l'effort global au cours des tâches de maintenance STAND et ROTAT (avec et sans exosquelette). L'effort perçu diminue avec l'exosquelette uniquement lors de la tâche de marche, alors même que ni l'activité des muscles fléchisseurs de l'épaule, ni le coût cardiaque ne sont réduits par cet équipement au cours de l'exercice (Cf. Tableau 1). Des questions relatives à l'effort local et non global se seraient probablement avérées plus pertinentes, afin d'objectiver les effets de l'exosquelette sur la perception des opérateurs au niveau de chaque groupe musculaire. Des investigations futures mériteraient donc d'être menées plus spécifiquement sur ce sujet.

## Conclusion

Il semble que l'utilisation d'un exosquelette d'assistance des membres supérieurs de type Exhaus® puisse être bénéfique pour réduire les efforts exercés par les muscles fléchisseurs de l'épaule lors de tâches de maintenance manuelle, sous certaines conditions. En revanche, les bénéfices apportés par cet équipement pourraient être contrebalancés par une augmentation des efforts musculaires antagonistes au mouvement assisté, des contraintes posturales et plus globalement par une hausse des sollicitations cardiaques. De plus, les avantages et limites de l'usage de l'exosquelette se sont avérés dépendants de la tâche étudiée, et même du mouvement opéré par les utilisateurs.

En pratique, ces résultats soulignent l'importance, pour les entreprises, de considérer et d'analyser les spécificités et les besoins d'assistance pour chaque situation de travail dans laquelle l'usage d'un exosquelette est envisagé [3]. En ce sens, il est nécessaire d'exercer une vigilance particulière lorsque les exosquelettes sont envisagés pour des tâches diversifiées, car il existe un fort risque que les bénéfices attendus ne soient pas, ou que partiellement, obtenus. Sur le plan technologique, il est également indispensable que les concepteurs de ces équipements apportent des améliorations à leurs produits, notamment au niveau de leur poids ou de leur équilibre dynamique, qui pourraient être impliqués dans la hausse des contraintes musculaires posturales et cardiovasculaires. Il est recommandé de focaliser les efforts de conception sur les aspects fonctionnels de l'assistance, vis-à-vis des contraintes extérieures de la tâche, et non sur les articulations ou groupes musculaires à soulager. Enfin, cette étude, spécifiquement focalisée sur l'évaluation des conséquences physiologiques de l'usage d'un exosquelette, ne doit pas faire oublier que, dans le cadre d'une démarche d'intégration aux processus d'un tel système en entreprise, il est nécessaire de conduire une analyse approfondie de la situation de travail, à la recherche de solutions de prévention axées prioritairement sur la transformation de l'environnement de travail, avant de procéder à une évaluation globale des conséquences induites par l'utilisation de l'exosquelette. ●

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] COLE M.H., GRIMSHAW P.N. – *Low back pain and lifting: a review of epidemiology and aetiology*. Work, 2003, 21, 2, pp. 173-184.
- [2] DE LOOZE M.P. ET AL. – *Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load*. Ergonomics, 2016, 59, 5, pp. 671-681.
- [3] AFNOR – *Dispositifs d'assistance physique à contention de type exosquelettes robotisés ou non – Outils et repères méthodologiques pour l'évaluation de l'interaction humain-dispositif*. Saint-Denis – La Plaine, Afnor, 2017.
- [4] LEE H. ET AL. – *The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13, 8, pp. 1491-1497.
- [5] BOSCH T. ET AL. – *The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work*. Applied Ergonomics, 2016, 54, pp. 212-217.
- [6] GODWIN A.A. ET AL. – *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.
- [7] LOTZ C.A. ET AL. – *The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task*. Journal of Electromyography and Kinesiology, 2009, 19, 2, pp. 331-340.
- [8] ABDOLI-ERAMAKI M. ET AL. – *Mathematical and empirical proof of principle for an on-body personal lift augmentation device (PLAD)*. Journal of Biomechanics, 2007, 40, 8, pp. 1694-1700.
- [9] GRAHAM R.B., AGNEW M.J., 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*. Applied Ergonomics, 2009, 40, 5, pp. 936-942.
- [10] SYLLA N. ET AL. – *Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry*. International Journal of Industrial Ergonomics, 2014, 44, 4, pp. 475-481.
- [11] BORG G. – *Borg's perceived exertion and pain scale*. In: USA: Human Kinetic, Vol. 1., 1998, p. 120.
- [12] RASHEDI E. ET AL. – *Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work*. Ergonomics, 2014, 57, 12, pp. 1864-1874.
- [13] HOLEWIJN M., HEUS R., WAMMES J.A. – *Physiological Strain Due to Load Carrying in Heavy Footwear*. European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology, 1992, 65, 2, pp. 129-134.

## POUR EN SAVOIR +

- L'offre d'information INRS sur les exosquelettes : [www.inrs.fr/exosquelettes](http://www.inrs.fr/exosquelettes)
- Les robots et dispositifs d'assistance physique : état des lieux et enjeux pour la prévention. INRS, 2017, NS 354. Accessible sur : [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr)

Les auteurs tiennent à remercier Audrey Casteleira et Mélodie Didier, ergonomes de l'entreprise à l'origine de la demande, pour leur aide logistique au projet.