

Exosquelette : évaluation des effets à moyen terme sur la santé des opérateurs et facteurs d'acceptation de l'équipement

Auteurs de l'étude : Xavier Dufour (Ergonome, kinésithérapeute, directeur de l'Institut de thérapie manuelle et de physiothérapie (ITMP) ; Pascal Girardot, Ergonome (OPPBTBTP)

L'exosquelette, un sujet qui fait débat

L'utilisation des exosquelettes fait encore débat dans le monde professionnel, certains pensant que c'est une réponse évidente aux contraintes mécaniques et d'autres mettant en avant les limites observées en termes de gain pour la santé avec ce type de matériel.

La société Hilti a commercialisé un exosquelette développé par la société Ottobock, appelé EXO-01, pour assister les opérateurs dans les tâches à réaliser au-dessus de la hauteur des épaules, par exemple lors de travaux au plafond ou en parties hautes des murs.

Les deux sociétés ont alors collaboré pour développer la seconde génération d'exosquelette appelée EXO-S.

Les populations visées par le développement de cet équipement sont des salariés d'entreprises du bâtiment, dont les tâches nécessitent une posture de travail amenant les mains, voire les coudes, au-dessus des épaules sur une partie significative du temps de travail, en adéquation avec l'objectif de l'EXO-01/EXO-S (plaquistes, électriciens, plombiers, désamianteurs, maçons...).

Les études existantes sur le port des exosquelettes ne permettent pas une approbation sans réserve pour leur utilisation. L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) met par exemple en avant **plusieurs points concrets de vigilance lors de l'utilisation d'un exosquelette** :

- Inconfort ou irritation de la peau
- Augmentation du stress
- Risque de collisions liées à l'encombrement
- Déséquilibres ou mouvements incontrôlés
- Apparition de nouvelles contraintes biomécaniques
- Augmentation des sollicitations cardiovasculaires.

En plus de ces points particuliers d'attention, les travaux récents de l'INRS sur les conditions de l'acceptation de ces équipements par les opérateurs ont conduit à la production d'un modèle de compréhension (cf. figure 2) et d'un questionnaire pour l'évaluation des différentes dimensions de cette acceptation. La présente étude s'est appuyée sur ces outils.

Hilti a demandé à l'Institut de thérapie manuelle et de physiothérapie (ITMP) d'objectiver les potentiels bénéfiques sur la santé et les éventuels effets secondaires négatifs sur ces populations sur une durée d'utilisation de 6 à 12 mois. En partenariat avec Hilti, l'Organisme professionnel de prévention du bâtiment et des travaux publics (OPPBTP) a soutenu l'étude dans le cadre d'une convention d'accompagnement à la démarche et d'assistance méthodologique et technique.

Différentes études préliminaires en biomécanique et en physiologie réalisées par Ottobock et Hilti lors de la conception et du développement de l'EXO-01 étaient encourageantes par rapport aux points de vigilance signalés par l'INRS.

Les résultats obtenus par la présente étude sont positifs sur les bénéfices ressentis par les opérateurs en lien avec les différentes dimensions de l'acceptation de l'équipement.



Matériel et méthode : une étude construite sur les retours des utilisateurs

Type d'étude

Il s'agit d'une étude quantitative par questionnaire reposant sur l'observation longitudinale de l'utilisation de l'exosquelette Hilti auprès des personnels de différentes sociétés clientes du groupe sur une durée de 6 à 12 mois.

Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude est d'évaluer, à partir des retours des utilisateurs, si l'utilisation de l'exosquelette permet d'améliorer la santé des opérateurs, ne provoque pas d'effets secondaires négatifs sur la santé, et son effet sur la productivité.

Population et sélection des participants

La population cible de l'étude est constituée **des personnels opérationnels d'entreprises** clientes de Hilti France. Plusieurs entreprises ont participé, allant de la

PME à des entités de grands groupes du BTP (Eiffage, SNIE, Bonglet, DI Environnement, Mainvielle).

Différents critères ont orienté la sélection des participants, notamment :

- Leur état de santé : l'Exo-01 n'ayant pas vocation à être catégorisé en dispositif médical, l'étude ne cherche pas à montrer les effets de l'utilisation de l'exosquelette par des opérateurs déjà atteints de troubles et potentiellement sous restriction médicale d'aptitude, ceux-ci ont donc été écartés de l'expérimentation.

En revanche, des opérateurs se plaignant d'une gêne et/ou de douleurs de légères à intermédiaires (même régulières) sont intégrés dans l'étude car celle-ci vise justement à évaluer l'évolution de cette gêne et de ces douleurs.

- Une ancienneté au poste supérieure à 6 mois et maîtrise des gestes de métier ;
- Une exposition récurrente aux situations de travail amenant les opérateurs à travailler les bras en hauteur.



Mise à disposition des exosquelettes et formation des utilisateurs (SNIE)

- l'exosquelette par des opérateurs déjà atteints de troubles et potentiellement sous restriction médicale d'aptitude, ceux-ci ont donc été écartés de l'expérimentation.

En revanche, des opérateurs se plaignant d'une gêne et/ou de douleurs de légères à intermédiaires (même régulières) sont intégrés dans l'étude car celle-ci vise justement à évaluer l'évolution de cette gêne et de ces douleurs.

- Une ancienneté au poste supérieure à 6 mois et maîtrise des gestes de métier ;
- Une exposition récurrente aux situations de travail amenant les opérateurs à travailler les bras en hauteur.



Lancement de l'étude sur un site Eiffage



Lancement de l'étude dans l'entreprise Bonglet

Répartition par métier

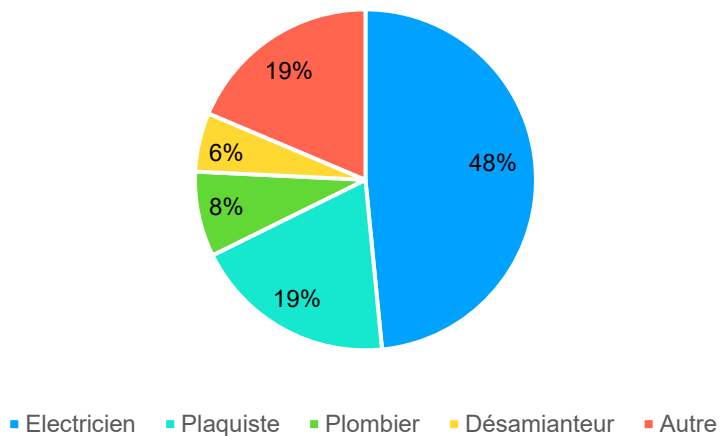


Figure 1 : Répartition des métiers au sein du groupe de participants initiaux

Méthodes et outils de recherche

Nous avons choisi de retenir **le questionnaire créé par l'INRS** (construit par Wioland et al., 2019) **sur le processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes**. Ce dernier est validé, utilisable et en libre accès sur le site de l'INRS¹.

Le questionnaire comprend deux volets qui ont été administrés en deux temps :

- Le volet « non-utilisateurs » a été proposé après la formation donnée aux personnels et avant la remise des exosquelettes à chaque participant. Il questionne les opérateurs notamment sur leur état de santé et leurs représentations a priori vis-à-vis de l'usage d'un exosquelette.
- Puis le volet « utilisateurs » a été proposé à tous les participants à l'issue d'une durée allant de 2 mois à plus d'une année (cf. répartition ci-dessous). Ce second questionnaire reprend les mêmes items que le premier sur l'état de santé, en interrogeant l'opérateur sur son état de santé perçu avant et après l'expérimentation ; il questionne également le ressenti de l'opérateur sur différentes dimensions (cf. plus loin).

Le recueil des données s'est fait par voie électronique pour faciliter le recueil et le traitement des données.

Questionnaire

Le questionnaire retenu repose sur **une cinquantaine de questions pour évaluer le processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes**, par comparaison des réponses avant et après utilisation. Chacune des six dimensions décrites dans le modèle de l'acceptation de l'INRS (cf. figure 2), est explorée à travers différentes questions.

La remise des questionnaires a été assurée par Hilti et relayée par les directions des entreprises partenaires, la compilation des résultats et leur traitement statistique ont été assurés par l'ITMP.

¹ Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : évaluation par questionnaire (Wioland, Debay, Atain-Kouadio, INRS, 2019) - <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20274>

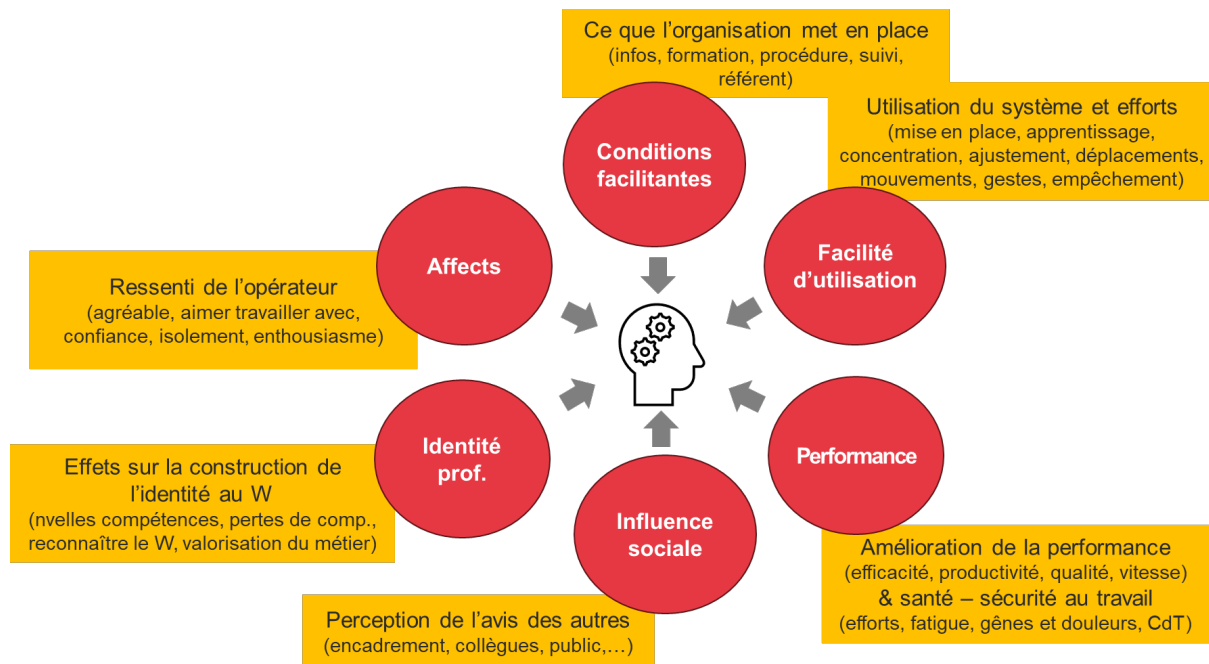


Figure 2 : Modèle INRS de l'acceptation (INRS, 2023)

Résultats : une intégration plutôt réussie mais dépendante des conditions d'usage de l'équipement

Population et utilisation

161 questionnaires « non-utilisateur » ont été remplis par les opérateurs volontaires lors de la remise de l'exosquelette qui leur a été confié.

Sur les retours du questionnaire « utilisateur », seuls 52 questionnaires remplis à distance avec ou sans l'aide de leur encadrement, ont été exploitables.

Ils proviennent de 40 opérateurs (aucune femme parmi les participants) avec, en moyenne 13,9 ans d'ancienneté dans le métier et 11 ans d'ancienneté dans l'entreprise. 12 d'entre eux ont été sollicités à deux reprises à plusieurs mois d'intervalle (d'où les 52 questionnaires pour 40 opérateurs). Cependant, dans la présentation des résultats, nous ne considérons ici pour ces douze opérateurs, que le **dernier** questionnaire rempli (et donc la durée d'utilisation correspondante).

La durée de mise à disposition de l'exosquelette pour les répondants au questionnaire " utilisateur " varie de 3 à 13 mois avec une moyenne de 243 jours (\approx 8 mois) et une durée médiane de 8,9 mois.

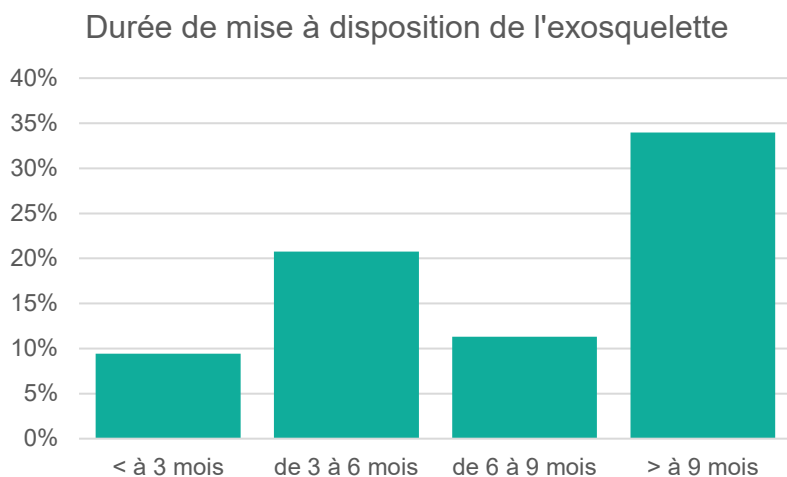


Figure 3a : Durée courante entre la mise à disposition et la passation du questionnaire « utilisateur » (multi répondants comptés une seule fois)

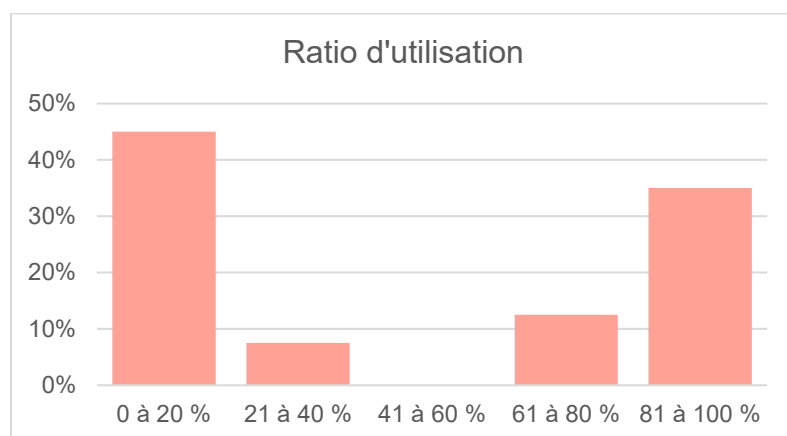


Figure 3b : Ratio d'utilisation de l'exosquelette (période de temps d'utilisation déclarée / durée de mise à disposition)

La durée d'utilisation déclarée par les utilisateurs (« combien de temps avez-vous utilisé l'exosquelette ? ») **varie de moins de 2 mois à plus de 9 mois** mais est à rapporter à la durée de la mise à disposition de l'exosquelette (variable selon les entreprises).

Le ratio d'utilisation ainsi obtenu (fig.3b) évoque une **réussite de l'intégration assez tranchée. Dans plus de 40 % des cas**, l'utilisation représente moins de 20 % de la durée de l'expérimentation, **signant un abandon de l'usage** soit par rejet de l'équipement, soit du fait d'un changement de chantier, les nouvelles tâches à réaliser ne justifiant plus l'exosquelette. Mais **pour plus du tiers des répondants, la durée d'utilisation est proche de la durée de mise à disposition, évoquant une adoption de l'équipement.**

La signification de cette durée d'utilisation est à mesurer au regard des métiers. En effet, pour certains des métiers concernés, en particulier les électriciens, la nature des chantiers d'affectation peut amener les utilisateurs à devoir réaliser sur plusieurs semaines (voire plusieurs mois) des tâches effectuées dans une posture préférentielle susceptible de bénéficier de l'assistance de l'exosquelette (travaux bras en hauteur, sur de la pose de câbles en plafonds suspendus par exemple). A contrario, ils peuvent avoir juste après à travailler pendant de longues périodes dans une posture

préférentielle qui ne justifiera pas son usage (travaux au sol, en planchers techniques par exemple).

Le fait de **reprendre l'utilisation d'un exosquelette (pour des tâches qui le justifient) après plusieurs mois d'interruption sera un signe fort de réussite de l'intégration de l'équipement**, marqueur de l'inscription de l'équipement dans les comportements routiniers, et sans doute également le signe de la contribution de l'encadrement de proximité à cette réussite.

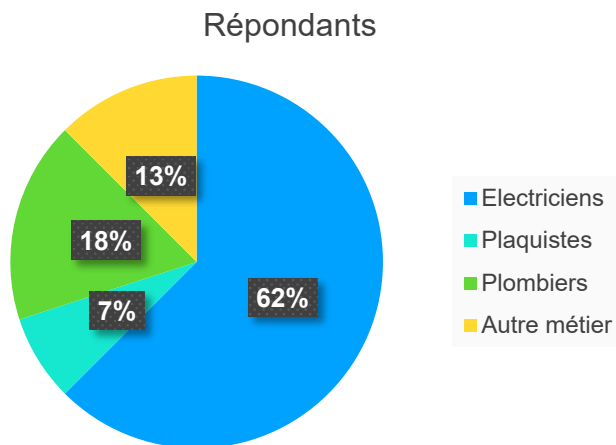


Figure 4 : Métiers des répondants au questionnaire « utilisateur »

Les opérateurs déclarent **porter l'exosquelette 120 minutes par jour en moyenne**, allant d'une durée estimée de 10 minutes à plus de 5 heures par jour en fonction des personnes, la moitié d'entre eux disent l'utiliser plus de 90 mn / jour.

NB : lors de la formation initiale à l'utilisation de l'équipement, il était précisé que celui-ci n'avait pas vocation à être porté plus de la moitié du temps de travail sur la journée. En moyenne, l'exosquelette est porté 2 jours par semaine, mais ce point est éminemment dépendant de l'organisation du chantier.

Facilité d'utilisation et performance ressentie



Le questionnaire comprend 13 questions fermées sur ce thème, avec un score de 1 à 5 ; un score de 3 correspond à la neutralité et 4 ou 5 à un gain intermédiaire.

Sur le plan de **l'installation et des réglages**, l'exosquelette est majoritairement considéré comme **facile à mettre en place**, et nécessitant peu d'avoir à refaire les réglages.

Dans l'utilisation (7 questions), **les opérateurs le disent facile à utiliser** et ne demandant pas d'effort de concentration supplémentaire (moitié des réponses égales ou supérieures à 4 sur 5).

Les réponses aux questions traitant du ressenti dans l'utilisation, sur le contrôle des mouvements et des déplacements, du caractère dérangent de l'exosquelette ou de la difficulté à s'habituer à travailler avec, sont plus nuancées et plus proches du

« moyennement d'accord » proposé tout en restant sur des scores positifs (« plutôt d'accord » ou « tout à fait d'accord », cf. figure 5).

Cependant, pour la plupart des questions de ce thème, **les réponses les plus positives correspondent aux répondants dont l'utilisation est la plus longue**, laissant penser que l'intégration de l'exosquelette au schéma corporel s'inscrit dans une dynamique d'apprentissage, qu'elle peut demander du temps et que la qualité de cette **appropriation par l'opérateur** est proportionnelle à la durée de l'utilisation.

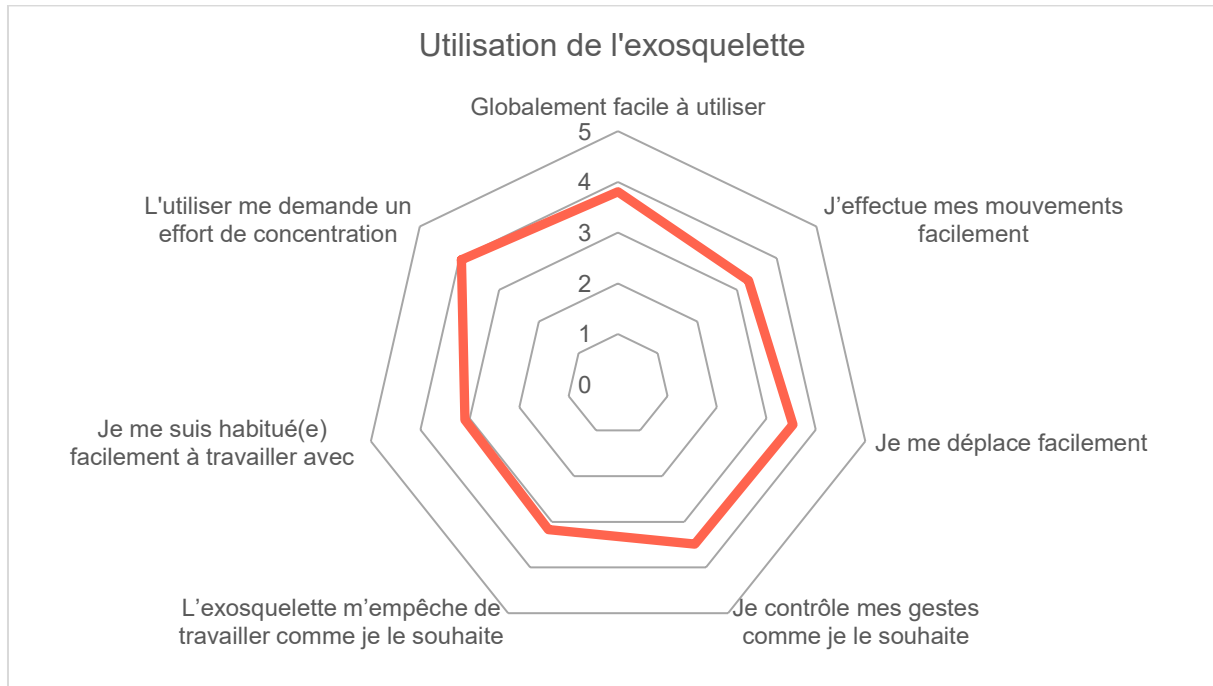


Figure 5 : Utilisation de l'exosquelette (moyennes des réponses par question)



Performance

La **performance** (en vitesse, qualité, productivité, efficacité) est très majoritairement ressentie par les opérateurs comme **identique avec exosquelette ou sans**. Cela correspond à l'objectif d'une réduction des efforts en maintenant la performance et peut être considéré comme **un résultat positif** tant il est fréquent que les expérimentations nous montrent une dégradation de la performance dans les premiers temps (jours, semaines) d'utilisation.

✓ Effets sur la santé et la sécurité

Le ressenti subjectif sur **la dépense énergétique** (efforts perçus) nécessaire à la réalisation des tâches, la fatigue et les conditions de travail donne un **résultat globalement positif** sans se démarquer significativement, les scores sont majoritairement proches de la moyenne et légèrement supérieurs à celle-ci.

Le point sur la sécurité perçue, montre **une petite réserve des répondants** sur leur sentiment d'être en sécurité avec l'exosquelette (moyenne 2,9/5). Cette réserve est

sans doute à mettre en rapport avec les propos recueillis dans le suivi de l'étude évoquant **les situations où l'exosquelette devient encombrant**, « s'accroche », en évoluant sur les équipements de travail en hauteur (trappes d'échafaudages, plateformes de travail, ...) ou avec l'environnement (chemins de câbles, structure de plafonds suspendus, ...).

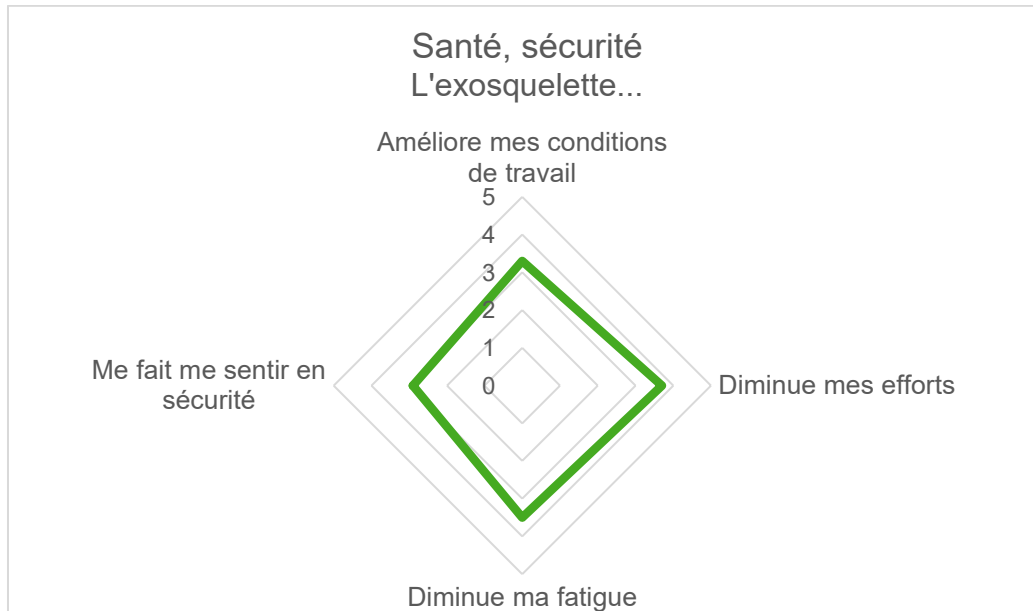


Figure 6 : Ressenti des opérateurs sur l'effet de l'exosquelette en santé et sécurité

Pour rappel, la **réduction de la fatigue et des efforts physiques** est le principal objectif, évalué ici comme atteint, de ce dispositif d'assistance physique.

✓ Douleurs - gênes

Six zones de douleurs / gênes possibles sont évaluées dans le questionnaire aux utilisateurs : dos, cou, épaules, bras, genoux et jambes. Les données recueillies présentent la fréquence ressentie d'apparition de ces douleurs **avant** l'utilisation de l'exosquelette (« Avant l'utilisation de l'exosquelette, j'avais des douleurs/gênes au niveau de ... ») et **après** cette utilisation, au moment du questionnaire (« Avec l'exosquelette, j'ai des douleurs / gênes... »).

Pour rappel, le protocole de l'étude prévoyait d'écarter les participants déclarant des troubles musculosquelettiques majeurs et/ou une restriction médicale d'aptitude en lien avec ces troubles.

Considérées globalement, toutes les moyennes des douleurs diminuent avec l'utilisation de l'EXO-01.

Comme vu plus haut, **l'équipement cible la réduction des efforts physiques** et n'a donc pas d'objectif « thérapeutique ». L'évaluation de l'évolution des douleurs a donc principalement pour buts d'évaluer la réduction éventuelle du ressenti d'une gêne douloureuse dans l'exécution d'une tâche et de surveiller l'apparition de nouvelles douleurs et en particulier de celles pouvant résulter de phénomènes de compensation.

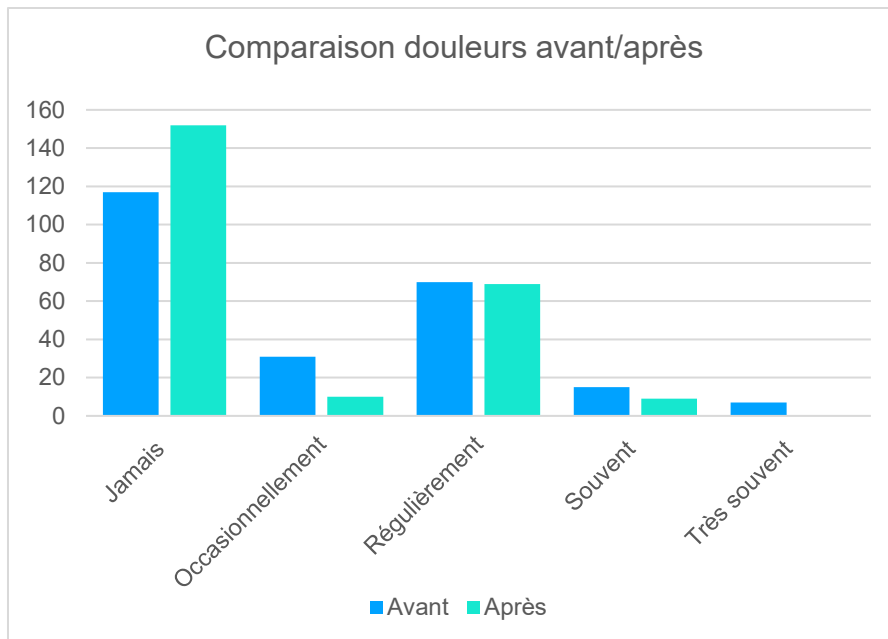


Figure 7 : Evolution des douleurs ressenties par les utilisateurs (réponses cumulées)

L'évolution de la douleur a été étudiée pour chaque zone (épaule, bras, cou, dos, genoux, jambes) entre « avant » la période d'utilisation et « après » (le moment du questionnaire), toujours en cumulant les réponses par fréquence ressentie d'apparition des douleurs.

Les réponses montrent globalement une **réduction de la fréquence ressentie d'apparition des douleurs**, notamment **sur les épaules**, directement ciblées par le dispositif d'assistance physique, La réduction concerne également **la région cervicale, les bras et le dos**.

L'étude des significativités montrent que les résultats sont statistiquement significatifs ($p \leq 0,05$) pour les questions concernant ces régions.

Les douleurs aux genoux et jambes ne montrent qu'une légère amélioration mais les résultats ne sont pas significatifs, par ailleurs ces zones corporelles ne sont pas concernées par l'assistance.

Aucune augmentation des douleurs, pouvant être interprétée comme un signe de compensation ou de report de contrainte, n'est notée.





Figure 8 : Résultats cumulés pour chaque zone corporelle

Puis nous avons évalué l'ensemble des réponses de chaque utilisateur en évaluant, zone par zone, cette fois pour chaque utilisateur, la différence entre ses réponses « avant » et « après ». Les résultats (240 réponses) sont regroupés en quatre catégories « amélioration », « maintien à 0 douleur », « aggravation » ou « stabilité. »

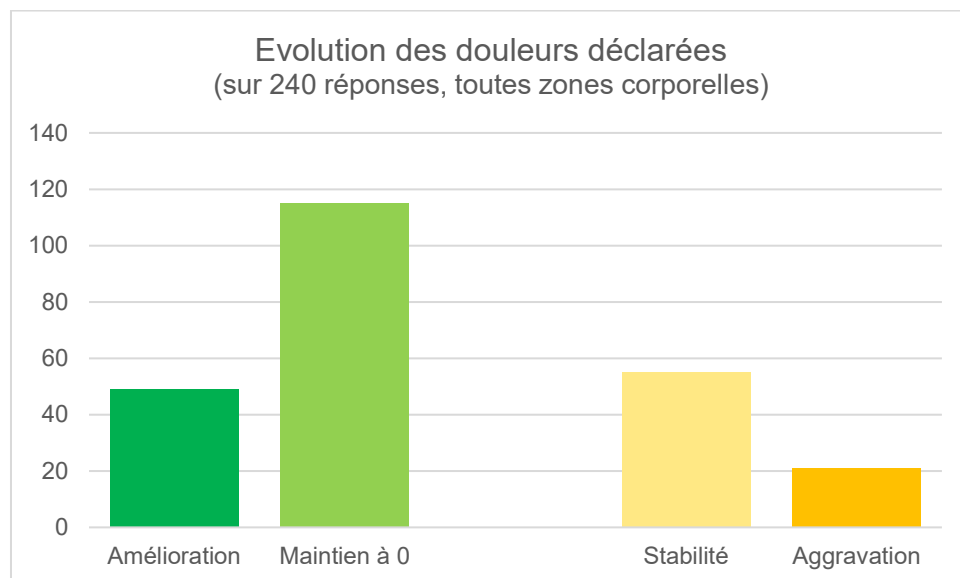


Figure 9 : Evolution de la fréquence déclarée d'apparition des douleurs pour chaque utilisateur sur chaque zone corporelle

Dans 20 % des cas, **la fréquence d'apparition des douleurs** est ressentie par les utilisateurs comme **diminuée à la suite de l'utilisation** de l'exosquelette (« amélioration »), ce score monte à 27% en ne considérant que le cou et les membres supérieurs, plus particulièrement ciblés par l'assistance physique.

Dans 9% des cas, des douleurs sont ressenties comme apparaissant plus fréquemment depuis l'utilisation de l'exosquelette.

Cependant, pour tous les opérateurs concernés, il n'y a **pas d'apparition de nouvelles douleurs** mais le ressenti de douleurs préexistantes se produisant plus fréquemment qu'auparavant ; la part attribuable à l'utilisation de l'exosquelette dans cette aggravation est donc difficile à évaluer.

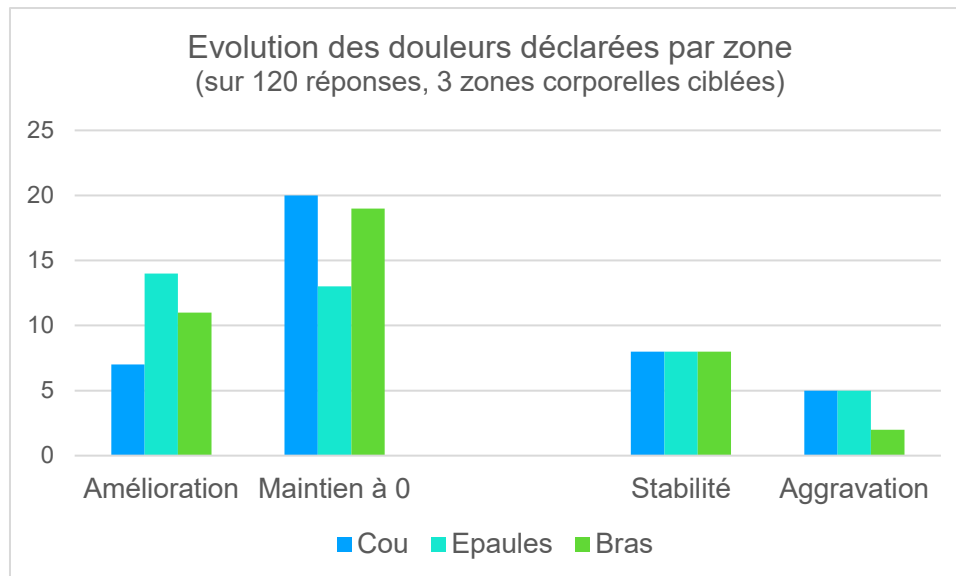


Figure 10 : Evolution de la fréquence déclarée d'apparition des douleurs sur les trois zones corporelles ciblées par l'équipement

Remarque : Le questionnaire initial « non-utilisateur », rempli avant la première utilisation, questionnait également les douleurs habituellement ressenties. La comparaison **à distance** entre les douleurs ressenties par chaque utilisateur sur chaque zone corporelle ainsi permise montre un écart faible entre les douleurs auto-évaluées avant l'étude et celles déclarées après l'étude comme antérieures à l'utilisation de l'exosquelette.

Douleurs/gênes : privilégier une utilisation en plusieurs séquences

La discrimination des résultats **selon les caractéristiques de la population** (âges, métiers, entreprise) ou selon les modalités d'usages ne permet pas d'obtenir des résultats statistiquement significatifs quant à l'évolution de la fréquence d'apparition des douleurs du fait d'effectifs trop limités par catégorie.

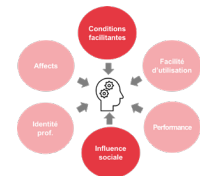
Il ressort toutefois de l'analyse quelques tendances intéressantes, bien que non statistiquement établies :

- L'**utilisation « en plusieurs séquences »**, fractionnée, donnerait de meilleurs résultats sur les douleurs / gênes ressenties qu'un usage « en continu ».
- Les deux paramètres prioritaires restent l'utilisation des **mains au-dessus de l'épaule de manière prolongée** et l'**autonomie** dans l'utilisation.
- Les résultats comparés **par métier** ne donnent pas de réelle indication du fait des faibles effectifs catégoriels et plus encore de la **diversité des situations de travail**, c'est finalement la fréquence des situations où les opérateurs sont

amenés à travailler avec les mains au-dessus des épaules qui est déterminante, plus que le métier. Dans les trois principaux métiers représentés, on trouve selon les chantiers, des situations où le travail s'effectue proche du sol et d'autres où l'action se déroule au plafond.

- Sur le plan de **l'ancienneté** au poste, les meilleurs résultats sont obtenus dans cette étude pour les opérateurs ayant de 10 à 30 ans d'ancienneté, par rapport à une ancienneté inférieure à 10 ans ou supérieure à 30 ans.

Conditions facilitantes et influence sociale : Les ressources à disposition et l'entourage professionnel



L'ensemble des collaborateurs déclare avoir reçu des informations, une formation et une procédure d'utilisation.

Dans le questionnaire rempli après utilisation, les opérateurs estiment que « les personnes dans l'entreprise » sont globalement favorables à l'intégration d'un exosquelette. Cependant cette donnée varie selon le statut de ces personnes : la présomption d'un avis favorable est franche lorsqu'il est question de la direction voire du responsable direct, mais l'est un peu moins lorsqu'il s'agit des collègues. Cette donnée montre que le regard des collègues reste un sujet sensible et pourrait être un frein à l'utilisation pour certains.

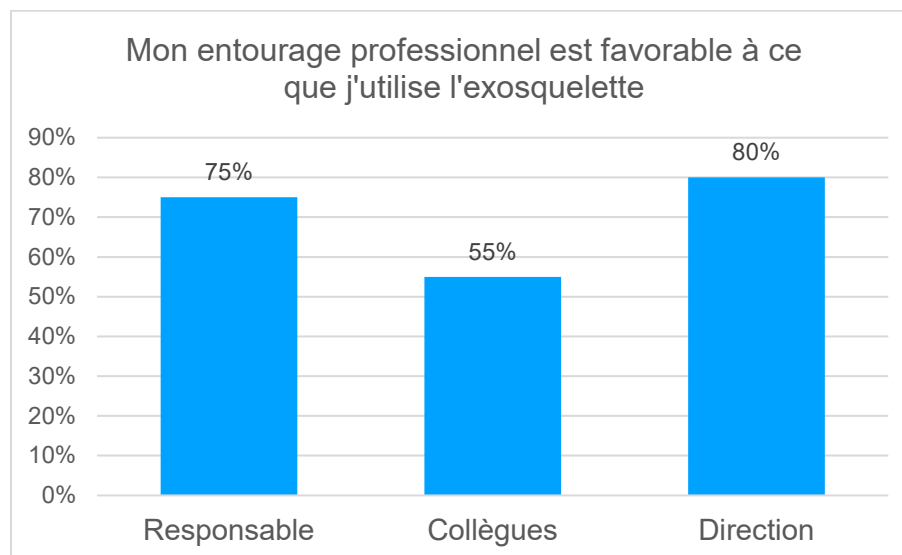
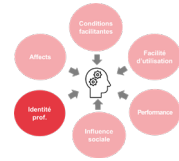


Figure 11 : présomption sur l'avis favorable de l'entourage professionnel (après période d'utilisation)

Cependant, dans l'analyse des réponses des **161 participants au questionnaire initial** avant toute utilisation, même si le graphique est semblable, **la présomption d'un avis favorable** y est plus importante avant qu'après l'utilisation, surtout pour les encadrants de proximité (passant de 90% à 75%). C'est également le cas pour les « collègues » et « direction » mais avec un écart beaucoup moins marqué. La mise à

l'épreuve par l'utilisation réelle de l'exosquelette montre que l'entourage, et particulièrement l'encadrement de proximité, serait moins favorable à cette utilisation, que ce qu'avaient imaginé les opérateurs initialement.

Identité professionnelle



Les résultats ne montrent pas d'appréhension face à un risque de modification / dégradation de l'identité professionnelle en lien avec l'intégration de l'exosquelette. Les avis sont partagés sur le fait que l'exosquelette contribue à **valoriser le travail**, avec un résultat à peine supérieur à la moyenne, en revanche les avis sont plus tranchés sur le fait que **l'exosquelette a bien sa place parmi les équipements de travail**.

Il n'y a pas de crainte exprimée sur **l'atteinte au sens du travail** ni sur le risque de perte de compétences (et pas non plus le sentiment d'en développer de nouvelles).

Affects



Il n'y a pas d'expression d'inquiétude, de nervosité, ou d'un sentiment d'isolement en lien avec l'utilisation du dispositif d'assistance dans les résultats.

Malgré l'absence d'une réponse tranchée (le score est égal à la moyenne) sur le fait d'aimer travailler avec l'équipement ni de marquer d'enthousiasme à le faire, plus de la moitié des participants (médiane à 4 / 5) disent souhaiter continuer à utiliser l'exosquelette si la possibilité leur est offerte après l'étude.

Débat : un équipement qui remplit ses objectifs mais un accompagnement des utilisateurs à prévoir

Dans le cadre de cette étude, nous pouvons affirmer que **la gêne et les douleurs déclarées par les participants ont diminué au niveau des membres supérieurs et du rachis**, après la période d'utilisation de l'exosquelette.

Pour les membres supérieurs, les données recueillies montrent une corrélation positive entre l'utilisation de l'exosquelette et la diminution de la douleur, ce qui est en adéquation avec l'objectif initial de conception de l'exosquelette qui semble particulièrement adapté aux situations de travail impliquant des postures de travail contraignantes pour les épaules.

Parallèlement, **les douleurs au niveau du dos et du cou ont aussi diminué de manière statistiquement significative**. Ceci répond à la crainte que l'usage de l'exosquelette contribue à déplacer les contraintes portant sur les membres supérieurs vers d'autres régions, en particulier le rachis. Or, il n'en est rien pour la population étudiée. À ce sujet, Hilti précise que la conception de l'EXO-01 est prévue pour transférer les contraintes de charge directement de l'épaule au bassin en réduisant les contraintes biomécaniques compressives sur le rachis, ce qui pourrait expliquer le

ressenti d'une diminution des douleurs dorsolombaires avec l'usage de l'exosquelette, même si celui-ci n'est pas conçu dans cet objectif.

A noter : la conception de l'EXO-01 ne semble pas provoquer de perte de mobilité ou de rigidification au niveau du rachis. Toutefois, nous ne pouvons pas en conclure que l'usage de cet exosquelette puisse être préconisé pour réduire toutes les douleurs dorso-lombaires, ce n'est pas l'objectif du dispositif.

Gênes et douleurs : des résultats en lien avec des facteurs différents

Ces deux résultats sur les douleurs étaient attendus en regard des choix de conception et confirment les premières études biomécaniques à court terme menées par Hilti. Les résultats de la présente étude confirment cette amélioration sur une utilisation plus longue du matériel par des opérateurs en conditions réelles.

Une diminution des **douleurs exprimées** au niveau des **membres inférieurs** était moins attendue car aucune raison biomécanique ne l'explique. En revanche, la mise en place de l'exosquelette au sein de branches de l'entreprise a eu des effets indirects positifs sur la communication interne autour de la sécurité et de la prévention. Plusieurs sites se sont fait l'écho de l'augmentation des échanges entre compagnons sur les troubles musculosquelettiques pendant l'étude.

Le ressenti exprimé par les opérateurs sur la **perception favorable** de l'exosquelette par leurs collègues et par les encadrants est globalement positif, surtout pour ces derniers. Cependant, l'évolution négative des réponses entre la position « *a priori* », exprimée dans le questionnaire initial, et celle exprimée après la période d'utilisation, en particulier chez les encadrants de proximité, ainsi que la proportion importante de répondants présumant leurs collègues (45%) et leurs responsables (25%) être « moyennement » favorables, voire défavorables, à les voir utiliser l'exosquelette peut faire craindre que le **collectif de travail ne soit pas aussi soutenant** qu'on pourrait le souhaiter.

Probablement pas spécifique à ce modèle d'exosquelette, **ce soutien relatif devra être considéré comme un point de vigilance** dans toute démarche d'intégration d'un exosquelette tant il risque d'être une condition de réussite du projet.

Une phase d'installation soignée à prévoir après une analyse fine du besoin

Précisons que la mise en place à l'utilisation de l'EXO-01 a été réalisée par les équipes de Hilti et les préventeurs des différentes entreprises équipées. **La mise en place soignée et l'accompagnement des collaborateurs peuvent être considérés comme des conditions nécessaires aux bons résultats.** Cette phase d'installation permet d'instaurer une dynamique intéressante autour de la prévention et de la sécurité par les entreprises souhaitant le mettre en place auprès des opérateurs.

Toutefois, dans une réelle démarche d'intégration d'exosquelettes dans une unité de travail, ce que ne prétend pas être cette expérimentation, cette phase d'installation (présentation de l'équipement, formation à son utilisation, accord sur les objectifs, ...) viendrait **après un temps d'analyse fine du besoin d'assistance** et d'échanges participatifs pour le choix des solutions et de leurs modalités d'intégration (voir à ce sujet la démarche proposée dans la norme NF X35-800). Ces travaux d'analyse

ergonomique des situations sollicitantes et de co-construction participative de solutions sont de nature à installer ou renforcer cette dynamique autour de la prévention des troubles musculosquelettiques.

Pas de perte ressentie de productivité liée à l'usage

Les réponses traitant de la **productivité subjective** de l'opérateur sont proches de la moyenne, légèrement au-dessus. Un constat positif montrant une légère hausse de productivité essentiellement liée à l'aide et à la diminution de la fatigue des opérateurs sans dénaturer leur activité et leur expertise professionnelle.

Plus qu'une éventuelle augmentation de productivité, qui n'est pas l'objectif premier de l'intégration d'exosquelette, le constat positif ici repose surtout sur **l'absence majoritaire du ressenti d'une perte de productivité liée à l'usage**.

On sait aujourd'hui combien le ressenti par un opérateur d'une diminution de sa productivité est préjudiciable à l'acceptation de l'équipement et entraîne souvent son abandon à court terme. Mais dans d'autres études, les mesures ont montré une légère baisse de productivité dans les premiers temps d'utilisation de l'exosquelette, en lien notamment avec la durée d'appropriation, avant de retrouver une productivité équivalente ou supérieure. Cela souligne l'importance d'un accompagnement par l'encadrement relativisant un objectif de productivité à court terme.

Concernant **les effets de l'assistance physique sur la dépense musculaire**, les réponses concernant les efforts à faire pour réaliser les tâches ou sur leur fatigue consécutive à cette réalisation montrent un résultat **mitigé mais plutôt positif**. Dans cette étude, il s'agit d'évaluer le **ressenti global** des opérateurs sur la réduction des efforts et de la fatigue dans **l'ensemble de leur activité** sur une période longue. La diversité des tâches réalisées et des situations rencontrées ne nous permet donc pas dans cette étude d'apprécier la performance de l'équipement dans la réalisation de ces tâches.

Cette performance spécifique est évaluée dans d'autres études ciblées, de manière objective, à l'aide d'outils et de méthodes différentes (chronoactivité, capteurs d'activité musculaire, cardiofréquence-mètre, ...) non mobilisés ici.

Les limites de l'étude

Dans les limites de cette étude, le nombre de questionnaires recueillis et exploitables est très inférieur à ce qui était espéré compte tenu du nombre d'opérateurs engagés dans la démarche (taux de réponse de 25%). Une partie de l'explication revient au mode privilégié par l'ITMP pour recueillir les données à distance, par voie électronique, plus ou moins bien maîtrisée par les participants et également par une difficulté des entreprises à accompagner et motiver leurs salariés volontaires pour prendre le temps du questionnaire. De nombreux questionnaires sont revenus incomplets, ils n'ont pas été traités dans les résultats présentés ici : sans doute la longueur du questionnaire et le recueil à distance y ont contribué.

Autre limite de cette étude, **l'absence de femmes** dans la population étudiée n'a pas permis de mettre en lumière d'éventuelles inadéquations entre l'usage de l'exosquelette et des caractéristiques, notamment morphologiques, des opératrices qui auraient pu apparaître dans les questions relatives à la facilité d'utilisation du dispositif.

Conclusion

Cette étude montre que dans le cadre d'une activité définie avec une mise en place coordonnée, le port de l'EXO-01 **va dans le sens d'une réduction des gênes et douleurs du membre supérieur et du tronc ressenties par les opérateurs.**

Par ailleurs, aucun effet négatif sur les autres parties du corps n'a été relevé lors de l'étude.

D'autres études pourraient permettre de définir si des paramètres d'utilisation ou de métier pourraient optimiser les résultats obtenus. Pour obtenir des résultats plus approfondis, il serait intéressant d'augmenter la taille du groupe pour améliorer la finesse de tri entre les variables discriminatives, et de travailler sur des situations spécifiques de travail.

Après avoir exploré les autres pistes dans l'organisation du travail ou dans les solutions collectives de prévention, qui seront toujours plus efficaces et moins contraignantes que les solutions individuelles, il paraît judicieux d'utiliser ce type d'exosquelette dans un but de réduction des contraintes biomécaniques sur les membres supérieurs et en particulier les épaules et donc d'aller dans le sens de la prévention des troubles musculosquelettiques pour les opérateurs travaillant avec les bras au-dessus de l'horizontale.

Suivi de terrain : les opérateurs témoignent sur le port de l'exosquelette

En marge de l'étude, une supervision de terrain a été assurée durant celle-ci sur certains sites d'expérimentation par des collaborateurs Hilti en lien avec les acteurs des entreprises et avec les opérateurs équipés.

Au-delà des retours exprimés à travers le questionnaire, **différents propos circonstanciés** sont également remontés par ce biais, ils peuvent apporter un éclairage sur certains résultats de l'étude dans l'esprit d'un retour d'expérience, mais ne sont que des expressions individuelles sans valeur statistique.

Les retours, qui émanent principalement des électriciens, sont présentés d'abord avec les points positifs puis les points de vigilance. Ces derniers ont été tous repris ici même si certains sont en lien avec un usage non préconisé par le fabricant.

Autour de la facilité d'utilisation, les réglages, le confort :

- « Aide bien au soulagement des épaules et des bras, mais aussi du dos et de la nuque parce qu'on est moins crispé » ;
- « Le poids est bien, ça ne pose pas de problème, ne cause pas de fatigue sur les jambes par exemple » ;
- « Une fois les réglages faits, pas de problème pour s'équiper chaque jour ».

- « Nettoyage des mousses ? Livraison de plusieurs mousses par exosquelette pour nettoyage entre utilisations ? » ;
- « Beaucoup porté en été : problème de transpiration, inquiétude sur l'hygiène »
- « En hiver : pas pratique avec doudoune » (électricien tertiaire) ;
- « Il faudrait modifier l'armature pour qu'il soit un peu plus près du corps, mais avec plus de protection car les frottements pourraient être gênants » ;
- « Faciliter le système de réglage pour pouvoir le prêter sans perdre de temps ».

Sur la performance de l'équipement et les cas d'usage :

- « *Top pour monter du supportage sur plateau nu* » (fluide / gaz médicaux) ;
- « *Pratique pour la dépose de luminaires assez lourds* » (électricien tertiaire) ;
- « *Je ne l'utilise pas très souvent, mais ressens une réelle différence quand je le porte* » (électricien tertiaire) ;
- « *Ça soulage pour les percements, jointements* » (électricien tertiaire) ;
- « *C'est bénéfique en cas de pose de boîtes* » (électricien industrie).

- « *Pas assez puissant, même réglé à fond, notamment pour le sertissage hydraulique : sertisseuse de plus de 15 kg* » (monteur réseau / infra) ;
- « *Manque un peu de puissance* » (électricien industrie) ;
- « *OK quand on travaille dans l'axe mais ne sert à rien quand on se tourne (tirage de câble)* » ;
- « *Il ne passe pas quand on monte sur les échafaudages (par les trappes)* » ;
« *Le travail en faux plafonds en 60 x 60 pose un problème : l'articulation de l'épaule (de l'exosquelette) coince ou se prend dans les faux plafonds* » (fluide / gaz médicaux).

Éthique

Cette étude à moyen terme portant sur l'impact des EXO-01 sur la santé des opérateurs suit la méthodologie de référence MR003 de la CNIL relative aux traitements des données à caractère personnel mis en œuvre dans le cadre des recherches dans le domaine de la santé.

Le traitement des données personnelles fait l'objet d'une déclaration de conformité déposée auprès de la CNIL sous le numéro 2227525.

Bibliographie

Wioland, L., Debay, L., & Atain-Kouadio, J.J. (2019). Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : Évaluation par questionnaire. *Références en santé au travail, INRS - Vu du terrain*, 160, page 49.
(<https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20274>)

Maurice, P. et al. (2019) : Objective and Subjective Effects of a Passive Exoskeleton on Overhead Work. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2020 Jan;28(1):152-164.

Schmalz, T. et al. (2019) : Biomechanical and Metabolic Effectiveness of an Industrial Exoskeleton for Overhead Work. *Int J Environ Res Public Health.* 2019 Nov 29;16(23):4792