



HAL
open science

Sapeurs-pompiers et désincarcération : effet du port d'un exosquelette sur la charge cognitive et l'acceptation

Sophie Lemonnier, Laura Cavagnac, Nathan Kohili, Kévin Bouillet, Pauline Maurice, Guillaume Mornieux

► To cite this version:

Sophie Lemonnier, Laura Cavagnac, Nathan Kohili, Kévin Bouillet, Pauline Maurice, et al.. Sapeurs-pompiers et désincarcération : effet du port d'un exosquelette sur la charge cognitive et l'acceptation. EPIQUE 2023 - 12ème colloque de Psychologie Ergonomique, Jul 2023, Paris, France. hal-04115097

HAL Id: hal-04115097

<https://hal.science/hal-04115097>

Submitted on 9 Jun 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sapeurs-pompiers et désincarcération : effet du port d'un exosquelette sur la charge cognitive et l'acceptation.

**Lemonnier Sophie, Cavagnac Laura, Kohili Nathan,
Bouillet Kévin, Maurice Pauline, Mornieux Guillaume.**

Université de Lorraine, PErSEUs, F-57000 Metz, France ; sophie.lemonnier@univ-lorraine.fr
Université de Lorraine, PErSEUs, F-57000 Metz, France ; laura.cavagnac@yahoo.com
Université de Lorraine, DevAH, F-54000 Nancy, France ; nathan.kohili.pro@gmail.com
Université de Lorraine, DevAH, F-54000 Nancy, France ; kevin.bouillet@univ-lorraine.fr
Université de Lorraine, CNRS, Inria, Loria, F-54000 Nancy, France ; pauline.maurice@loria.fr
Université de Lorraine, DevAH, F-54000 Nancy, France ; guillaume.mornieux@univ-lorraine.fr

Catégorie de soumission : communication longue

RÉSUMÉ

En France, plus de 80% des maladies professionnelles sont des troubles musculosquelettiques, et les sapeurs-pompiers (SP) sont particulièrement à risque. Notre objectif était de tester les effets de la solution exosquelette pour ce corps de métier. Cette étude compare deux conditions de réalisation d'une tâche de désincarcération par des SP : avec et sans exosquelette. L'impact est évalué sur l'activité musculaire des membres supérieurs (EMG), sur les ressources cognitives (NASA-TLX), et sur l'acceptation (questionnaire). Les résultats n'ont montré quasiment aucune différence au niveau musculaire, et pour la charge cognitive, seulement une fatigue physique ressentie plus faible avec l'exosquelette, ce qui nous conduit à parler d'effet placebo du port de l'exosquelette. L'évaluation de l'acceptation de l'exosquelette semble être globalement favorable. Cependant, des limites à cette étude sont discutées, notamment celles liées à la taille et aux caractéristiques de notre échantillon.

MOTS-CLÉS

Sapeurs-pompiers, Désincarcération, Exosquelette, Charge cognitive, Acceptation.

1 INTRODUCTION

1.1 Sapeurs-pompiers, TMS et solution exosquelette

En 2020, les sapeurs-pompiers (SP) français ont effectué plus de 4 millions d'interventions, soit près de 12 000 interventions par jour, dont 84% sont des secours d'urgence aux personnes. Leurs missions sont généralement sollicitantes mentalement et physiquement, et impliquent très fréquemment du port de charge, sans compter la tenue de feu qui pèse déjà environ 20 kg (Stenger, 2018). Pour pouvoir être recrutés, les SP doivent présenter des paramètres anthropométriques et avoir une condition physique compatible avec leur activité opérationnelle selon l'arrêté du 26 janvier 2013 (Stenger, 2018). Ils suivent ensuite des entraînements physiques réguliers afin de maintenir leur condition physique pour leur sécurité et celle des victimes, et préservent ainsi la survenue de douleurs, de troubles musculosquelettiques (TMS) ou de maladies cardiovasculaires (Puchaud, 2020).

Malgré cela, d'après la Banque Nationale de Données (BND), les lésions les plus fréquentes chez les SP sont les atteintes ostéoarticulaires et/ou musculaires (environ 30% des accidents de service). Ils sont également atteints de douleurs et de lumbago dans 12% des accidents de service. Ces atteintes peuvent conduire à différents types TMS, le dos et les membres supérieurs étant les plus touchés. Il

est rapporté dans la littérature qu'une forme plus ou moins grave de TMS est diagnostiquée chaque semaine chez les SP (Nazari et al., 2020).

Les TMS sont des pathologies d'origine professionnelle qui se manifestent en premier lieu par des douleurs et de la fatigue musculaire et qui peuvent conduire à une incapacité chronique. En 2021, un total de 40 852 TMS ont été recensés en France, ce qui représente 86% des maladies professionnelles (Assurance maladie, 2022). D'après le modèle dynamique proposé par l'INRS (Wioland et al., 2019b), les TMS sont le résultat d'une combinaison de facteurs psychosociaux (i.e., relations au travail, intensité et complexité de la tâche, exigences émotionnelles, autonomie...), du stress, de l'organisation du travail (i.e., horaires, rythme, conditions d'exécution de la tâche, formation, délai de réalisation, le temps de récupération...) et des sollicitations biomécaniques (i.e., répétitivité des gestes, adoption de postures contraignantes, port de charges, exposition aux vibrations...). Les sollicitations biomécaniques sont centrales dans l'apparition des TMS, cependant les autres facteurs ont également un rôle prépondérant. En effet, une forte charge mentale, une forte demande psychologique en lien avec une faible latitude de décisions, sont des causes présentes chez des personnes souffrant de TMS (Bongers et al., 2002).

Différentes études ont montré que l'utilisation d'un exosquelette permettrait une réduction des contraintes musculosquelettiques (de Looze et al., 2016 ; Theurel & Desbrosses, 2019). Ces études n'ont pas spécifiquement étudié les tâches d'intervention chez les SP. Nous avons donc voulu investiguer si le port d'un exosquelette pouvait être une solution pour diminuer les TMS chez les SP, comme c'est de plus en plus le cas dans le milieu industriel.

1.2 Charge cognitive, acceptabilité et problématique

La majorité des études qui ont été réalisées sur l'utilisation d'exosquelette s'accorde sur une baisse de 10 à 60% du niveau d'activité des muscles assistés par le dispositif comparé à la réalisation d'une même tâche sans exosquelette (Theurel & Claudon, 2018). Cela confirme le potentiel de l'usage de ces nouvelles technologies en milieu professionnel. Cependant, cette nouvelle technologie présente certaines limites qui peuvent engendrer des conséquences sur la santé et la sécurité des utilisateurs (Theurel & Claudon, 2018). En effet, l'utilisation d'un exosquelette peut augmenter le temps de réaction (Bequette et al., 2020) et peut générer des risques en lien avec la charge cognitive (augmentation des exigences attentionnelles, incidence sur l'expertise, perte de contrôle et d'autonomie). Cela peut modifier la perception que l'utilisateur a de sa tâche, avoir un impact sur le regard des autres et générer une augmentation de la charge cognitive et du stress chez l'agent utilisateur et donc diminuer voire annuler les bénéfices de l'exosquelette au niveau de la charge physique (Zhu et al., 2021).

La charge cognitive correspond à la quantité de ressources cognitives investie par un individu lors de la réalisation d'une tâche (Chanquoy et al., 2007). Une évaluation subjective de la charge de travail, et notamment des exigences mentales, peut être faite grâce à des questionnaires comme le *National Aeronautics and Space Administration Task Load index* (NASA-TLX ; Larue, 2002).

Par ailleurs, l'acceptabilité, qui prédit l'intention d'utilisation (Barcenilla & Bastien, 2009), est également impactée négativement par l'augmentation de la charge cognitive (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009). Il est alors primordial, en plus d'évaluer l'impact sur la charge physique et cognitive, de prendre en compte les critères d'acceptabilité et d'acceptation propres à la population qui a pour vocation d'être équipée, afin d'identifier les éventuels points bloquants et ainsi limiter les phénomènes de rejet du dispositif (Wioland et al., 2019b). On parle d'acceptabilité lorsque l'on étudie les intentions d'utilisation chez les non-utilisateurs et d'acceptation si on étudie l'usage effectif du dispositif chez les utilisateurs (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009). Sur la base du travail de Bobillier-Chaumon (2016), l'INRS a élaboré un questionnaire visant à évaluer la notion d'acceptabilité des exosquelettes par les utilisateurs et d'identifier les points bloquants et facilitants, les effets en termes de santé et de sécurité, et de comprendre l'interaction entre l'utilisateur et l'exosquelette (Wioland et al., 2019a). Ce questionnaire est structuré selon six dimensions inspirées du modèle UTAUT (Venkatesh et al., 2003) : la facilité d'utilisation, les attentes de performance (ou l'utilité perçue) en termes de

productivité et de santé et sécurité, les conditions facilitantes, l'influence sociale, les aspects sur l'identité professionnelle et les affects (ressenti de l'utilisateur).

Notre étude avait donc un double objectif : 1/ comparer des conditions avec et sans exosquelette afin d'estimer son impact sur l'activité musculaire des membres supérieurs et les ressources cognitives ; 2/ étudier le niveau d'acceptation de l'exosquelette et les raisons sous-jacentes.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 Participants

La population étudiée est composée de 12 SP du SDIS54 (Service Départemental d'Incendie et de Secours de Meurthe & Moselle), tous de sexe masculin, 5 SP volontaires et 7 professionnels. Ils avaient en moyenne 31,25 ans (ET = 9) et une ancienneté moyenne de 10,58 ans (ET = 9,14). Huit d'entre eux exercent à la caserne Nancy-Tomblaine, les autres viennent du Centre de formation Kléber, de l'Etat-Major et des casernes de Haraucourt et Einville-au-Jard. Les participants sont en bonne santé, et n'ont pas eu de traumatismes des membres supérieurs ou du rachis au cours des six derniers mois, et étaient déclarés aptes à intervenir sur un secours réel de désincarcération.

2.2 Tâche de désincarcération

La tâche choisie pour l'étude est la manipulation de l'écarteur et de la cisaille (Holmatro) lors d'un parcours de désincarcération. Ils sont tous deux électriques et portatifs (sur batterie). La cisaille permet de sectionner la tôle et les montants de porte des véhicules et l'écarteur permet aux SP d'écarter et de travailler la tôle des véhicules. Pour ouvrir et fermer les pinces de découpe ou d'écartement, il faut tourner une poignée située à l'arrière, soit dans un sens, soit dans l'autre. L'effort est donc uniquement lié au port des outils et à leur manipulation. Ils pèsent tous deux environ 22 kg.

Le parcours consiste en l'écartement et la découpe de différents éléments d'une voiture (Figure 1, photos sur [OSF](#)). Il a été défini en collaboration avec le SDIS54, afin de couvrir les gestes et postures typiques de la désincarcération, tout en étant suffisamment répétable pour que les données obtenues puissent être comparées d'un essai à un autre. Ce parcours a été réalisé uniquement à l'extérieur du véhicule, le participant n'est jamais rentré dans le véhicule. Chacune des étapes était minutée afin que les essais soient comparables. A noter que l'objectif n'était pas la découpe du véhicule en soi, mais bien la manipulation des outils. Le parcours complet a une durée de 3 minutes.



Figure 1 : Les 5 étapes de la tâche de désincarcération.

2.3 Exosquelette

L'exosquelette d'assistance aux membres supérieurs Mate-XT (développé et commercialisé par la société Comau20) a été utilisé (photos sur [OSF](#)). Il est portable et passif (non motorisé) car il fonctionne à base de stockage d'énergie avec des ressorts. Le système se porte comme un sac-à-dos, avec une ceinture à boucle au niveau des hanches, des straps au niveau des bras et une sangle au niveau de la poitrine. Il pèse environ 4 kg. Il est réglable en plusieurs points pour s'adapter à différentes morphologies. Le système fournit une assistance aux épaules lors de l'élévation du bras : il permet de compenser une partie du poids de la charge soulevée, en reportant une partie de l'effort sur les hanches, grâce au système de ressort et à la structure rigide. L'assistance est réglable avec une molette selon huit niveaux, l'assistance maximum de 6 kg par bras a été utilisée pour l'ensemble de l'étude.

2.4 Outils de mesures

EMG : Pour tester l'effet du port de l'exosquelette au niveau musculaire, 14 électrodes d'électromyographie (EMG) de surface Snap-Lead ont été placées de manière bilatérale pour enregistrer l'activité musculaire du dos, de l'épaule et du bras (recommandations de Seniam ; trapèzes supérieurs, longissimus dorsi, érecteurs spinaux, brachioradialis, triceps brachial, biceps brachial, deltoïdes antérieurs ; fréquence de capture 1926 Hz). Les données étaient enregistrées avec le logiciel Delsys EMG Work.

Questionnaire NASA-TLX : Afin d'évaluer la charge de travail, nous avons fait passer un NASA-TLX (Cegarra & Morgado, 2009). Ce questionnaire se focalise sur 6 facteurs (Exigence mentale, physique et temporelle, Effort, Performance et Frustration), et s'effectue en deux temps : 1/ estimer l'impact de chaque facteur grâce à six échelles ; 2/ comparer les facteurs deux à deux grâce à quinze cartes.

Questionnaire [acceptation \(OSF\)](#) : Afin d'évaluer l'acceptation de l'exosquelette, les SP ont répondu à un questionnaire inspiré de celui proposé par l'INRS (Wioland et al., 2019b). Il est structuré en six dimensions : la facilité d'utilisation, les attentes de performance en termes de productivité et de santé et sécurité, les conditions facilitantes, l'influence sociale, les aspects sur l'identité professionnelle et les affect. Les modalités de réponses suivent une échelle de Likert en 5 points.

2.5 Protocole expérimental

L'expérimentation s'est déroulée à la caserne de Nancy-Tomblaine. Le participant, préalablement informé de l'expérience, de ses droits et des risques, a signé le formulaire consentement éclairé. Les capteurs EMG ont été placés après une phase de préparation de la peau (rasage, abrasion et désinfection de la zone). Il a ensuite été invité à réaliser des mouvements aléatoires et à manipuler une chaise pendant quelques instants afin de se familiariser avec l'exosquelette. Puis il a commencé le parcours de désincarcération. Chaque participant a effectué deux fois le parcours, une fois avec l'exosquelette et une fois sans, avec un repos de quelques minutes entre les deux. L'ordre des deux conditions a été contrebalancé. A l'issue de chaque essai, le participant a répondu au NASA-TLX, puis, à la fin des deux essais, au questionnaire d'acceptation. Le participant était ensuite déséquipé. La durée totale de l'expérimentation a été de 3 heures maximum.

2.6 Analyse des données

Le signal EMG a été nettoyé avec un filtre Butterworth d'ordre 4. En raison de la non-normalité des données, des tests de Wilcoxon signed-rank ont été effectués, avec un risque d'erreur de 5%. Pour le questionnaire NASA-TLX, le protocole du test a été suivi afin d'obtenir deux notes : un score global par condition (avec / sans exosquelette), puis pour chaque facteur, son poids et sa note brute. Les données suivant une loi normale (Test Shapiro-Wilk), un *t* de Student a été appliqué sur les scores globaux, avec un risque d'erreur de 5%. Pour l'évaluation de l'acceptation, une analyse descriptive a été conduite par dimension.

3 RESULTATS

3.1 Activité musculaire

Une différence significative a été observée pour le biceps brachial droit ($p = 0,04$) avec une augmentation en moyenne de 10% lors du port de l'exosquelette. Aucune différence significative n'a été observée pour les autres muscles.

3.2 Charge cognitive

Pour le score global, la différence sans ($53,8 \pm 9,6$) et avec ($49,7 \pm 9,5$) l'exosquelette est non significative ($t(11) = 1,37, p = 0,20$). Les résultats montrent qu'il existe une différence significative entre les deux conditions uniquement pour le facteur Exigence physique ($t(11) = 2,45, p = 0,03$), avec un score plus important sans exosquelette ($265 \pm 85,1$) plutôt qu'avec ($216 \pm 78,2$).

3.3 Evaluation de l'acceptation

Pour « Conditions facilitantes », 90% des personnes disent avoir bénéficiées de Réunion, Formation, Procédure et Suivi. Pour les trois autres items (Table 1), la majorité des participants semble

		1	2	3	4	5
Cond. Facili.	Mise à disposition des info. nécessaires	0	0	2	5	5
	Personne désignée pour aider	0	1	1	5	5
	Soutien des collègues	0	0	0	5	7
		0%	3%	8%	42%	47%
Facilité d'utilisation	Facilité de mise en place	0	1	3	6	1
	Rapidité d'apprentissage	0	0	0	10	2
	Niveau de concentration plus important	2	6	3	0	1
	Besoin de faire des réajustements	8	3	1	0	0
	Facilité d'utilisation	0	1	1	9	1
	Facilité de déplacement	0	2	3	4	3
	Facilité de mouvement	0	2	5	5	0
	Contrôle de gestes	1	2	2	6	1
	Pas de sensation d'empêchement de travailler	0	1	4	4	3
	10%	17%	20%	41%	11%	
Dim. Sociale	Responsable favorable	0	1	1	5	5
	Direction favorable	0	0	1	8	3
	Collègues favorables	0	3	2	6	1
	Personnes importantes favorables	0	1	1	8	2
	0%	10%	10%	56%	23%	
Identité pro.	A sa place dans mon travail	0	0	5	2	5
	Valorisation du métier	0	3	6	3	0
	Reconnaître son travail	0	1	2	3	6
	Développement de nouvelles compétences	2	1	5	4	0
		4%	10%	38%	25%	23%
	7	4	1	0	0	
Afectifs	Anxiété	6	4	1	1	0
	Nervosité	6	3	3	0	0
	Isolement	6	4	2	0	0
		50%	31%	17%	3%	0%
	Enthousiasme	1	1	2	7	1
	Agréabilité	1	1	2	7	1
	Aimer travailler avec	0	0	4	6	2
Confiance	0	0	3	8	1	
	4%	4%	23%	58%	10%	
Sécurité	Amélioration des conditions de travail	1	1	3	7	0
	Sécurité	0	1	4	6	1
	4%	8%	29%	54%	4%	
Production	Vitesse	0	2	8	2	0
	Productivité	0	1	7	4	0
	Efficacité	0	0	5	6	1
	Qualité	0	0	8	4	0
	0%	6%	58%	33%	2%	
Santé	Efforts physiques	0	9	3	0	0
	Fatigue	0	5	7	0	0
	0%	58%	42%	0%	0%	

Table 1 : Réponses recueillies pour différentes dimensions du questionnaire d'acceptation (effectif par item, converti par bloc en pourcentage). Les items étaient évalués selon une échelle de Likert en 5 points allant de Pas du tout d'accord (1) à Tout à fait d'accord (5), à l'exception des deux derniers blocs (« Production » et « Santé ») évalués de Beaucoup moins importante à Beaucoup plus importante.

avoir un avis plutôt positif. Pour « Facilité d'utilisation », seule la nécessité de faire des réajustements et la concentration supplémentaire semblent inquiéter certains participants. Pour « Attentes de performance » de production et de sécurité (Table 1), la majorité des participants ont trouvé la situation identique voire meilleure avec l'exosquelette. En termes de santé, environ la moitié des participants ont observé une amélioration des conditions de travail, et l'autre moitié n'a souligné aucune amélioration. Pour « Gènes et douleurs » (Table 2), lors de l'utilisation de l'exosquelette, 2/3 des participants n'ont observé aucun changement et 1/3 une diminution de la gêne. Aucun participant n'a souligné l'apparition d'une gêne ou douleur avec l'exosquelette. Pour « Influence sociale », « Identité professionnelle » et « Affects » (Table 1) : la majorité des participants a pensé être soutenu socialement (responsable, direction, collègue, personne importante) dans l'utilisation de l'exosquelette. Les avis concernant l'identité professionnelle étaient relativement neutres. Même s'ils ne pensaient pas que l'exosquelette leur ferait perdre des compétences, ils estimaient qu'ils n'en acquerraient pas non plus de nouvelles. Concernant les affects négatifs, les participants répondaient globalement ne pas en ressentir à l'égard de l'utilisation d'un exosquelette. En revanche, les affects positifs entraînaient des réponses plus nuancées, mais globalement positives.

	Sans changement	Diminution/Disparition	Aggravation/Apparition
Rachis cervical	9	3	0
Epaules	7	5	0
Membres supérieurs	5	7	0
Dos	6	5	0
Membres inférieurs	10	2	0
Genoux	10	2	0
	66%	34%	0%

Table 2 : Réponses recueillies pour la dimension « Gènes et douleurs ».

4 DISCUSSION

4.1 « Effet placebo » et acceptation de l'exosquelette

L'objectif de cette étude était double, il s'agissait de comparer deux conditions de réalisation de la tâche de désincarcération, avec et sans exosquelette, afin d'estimer l'impact de celui-ci sur l'activité musculaire des membres supérieurs et les ressources cognitives, ainsi que d'en évaluer l'acceptation.

Les résultats sur l'activité musculaire montrent que l'exosquelette dans cette étude ne réduit pas l'effort physique au niveau des membres supérieurs, voire semble l'augmenter pour le biceps droit. Cependant, quand on s'intéresse à la charge de travail et plus spécifiquement à l'exigence physique ressentie, on observe une diminution de celle-ci avec le port de l'exosquelette. On peut alors se demander si l'exosquelette n'a pas un effet placebo sur les participants.

Concernant l'acceptation de l'exosquelette, on peut conclure que la majorité des participants sont favorables à sa mise en place au sein de leur caserne. Les principales raisons de l'acceptation sont : les conditions facilitantes, c'est-à-dire ce que l'organisation va mettre en place en termes d'informations, de formation, de suivi, et la facilité d'utilisation du système. Cela comprend : la mise en place, l'apprentissage, la nécessité de faire des réajustements, la concentration nécessaire ou encore la facilité de déplacement et de mouvement. En revanche, l'influence sociale, notamment la perception des collègues et des personnes importantes pour l'utilisateur, ainsi que le ressenti de l'utilisateur vis-à-vis du dispositif, s'avèrent être les principales raisons du rejet de l'exosquelette.

Les résultats de ces études sont globalement cohérents avec les résultats de l'étude menée par l'INRS en 2019 (Wioland et al., 2019b). En effet, comme pour notre étude, les résultats montraient que les conditions facilitantes constituent une des raisons de l'acceptation. En revanche, les résultats de l'INRS diffèrent des nôtres au niveau des dimensions portant sur les attentes de performance et l'influence sociale. Cela peut être dû au corps de métier interrogé (opérateur versus SP) ou à l'exosquelette utilisé. De plus, dans notre étude, nous évaluons l'acceptation après un seul usage de

l'exosquelette, ce que nous évaluons est donc très proche de l'acceptabilité. Il serait intéressant de réitérer les différentes mesures, et notamment l'acceptation, après un usage régulier de cet outil.

4.2 Choix de l'exosquelette

Lors des expérimentations, l'exosquelette ne pouvant être mis en-dessous de la tenue de feu des SP, il a été mis au-dessus. Or, dans ce cas, il ne serait pas protégé en cas d'intempéries et les excroissances pourraient constituer des points d'accroche lors de son utilisation à l'intérieur du véhicule. Cet exosquelette ne pourrait donc pas être déployé en l'état sur le terrain et nécessiterait des modifications. Un des SP participants a souligné qu'un exosquelette directement intégré à une veste de feu serait l'idéal en termes de protection du dispositif et de facilité de mise en place.

Les SP étant habitués à porter un appareil respiratoire isolant (ARI) lors de leurs interventions, la mise en place de l'exosquelette leur est facilitée, celui-ci se plaçant a priori au même endroit au niveau du dos et se fixe sensiblement de la même manière. En revanche, l'exosquelette nécessite un réglage préalable à son installation en fonction de la taille de celui qui le porte. Ce détail pourrait être un point bloquant si la morphologie des utilisateurs diffère selon les interventions et que l'exosquelette doit être réglé à chaque utilisation, surtout en situation d'urgence.

Au regard des résultats de l'étude, notamment du point de vue de la charge physique, on peut se demander si le choix d'un exosquelette passif à assistance des membres supérieurs est judicieux. En effet, il apporte une assistance uniquement lorsque les bras sont en l'air, or la manipulation des outils n'implique finalement que très rarement cette posture. L'assistance de l'exosquelette peut également s'avérer trop faible (6 kg par bras) au regard du poids des outils (environ 22 kg) mais ceci est inhérent au système passif de l'exosquelette qui est moins performant qu'un exosquelette actif. De plus, l'exosquelette empêche l'utilisateur de se pencher en avant comme il le souhaite et lui impose de plier les genoux, cependant en situation d'urgence les SP peuvent avoir besoin d'adopter certaines positions que l'exosquelette rend plus difficiles.

4.3 Limites de notre étude et perspectives

Certains déterminants ont pu influencer nos résultats, notamment favoriser l'acceptation : tous les participants étaient volontaires et en bonne condition physique. De plus, ils sont habitués à avoir régulièrement des nouveaux outils dans la caserne avec une formation à ce matériel ce qui peut favoriser l'acceptabilité. En revanche, certains déterminants de l'expérimentation ont pu diminuer l'acceptation de l'exosquelette, dont la durée de l'expérience. De plus, la phase de familiarisation et les phases de test ne durant que quelques minutes, les utilisateurs n'ont eu qu'un court instant pour apprivoiser l'exosquelette et n'ont pas eu le temps de s'habituer à l'utiliser, ce qui a pu influencer leurs réponses, notamment vis-à-vis de leur ressenti.

Plus généralement, nous n'avons pu constituer qu'un petit échantillon, ce qui a pu impacter la significativité des résultats. De plus, nos participants étaient tous masculin. L'absence de participante nous prive de leur ressenti qui peut être différent de celui de leurs collègues masculins. Notamment, n'ayant pas nécessairement les mêmes capacités et caractéristiques physiques, l'assistance apportée par l'exosquelette peut être ressentie différemment. Aussi, l'exosquelette apportant une assistance jusqu'à 6 kg au niveau des membres supérieurs lorsque les bras sont en l'air, il se peut que les bras soient poussés en avant vers le haut si les triceps ne sont pas contractés. L'exosquelette serait alors une contrainte pour les postures où les bras ne sont pas en l'air. De plus, l'exosquelette étant fixé à l'aide d'une ceinture au niveau des hanches et d'une sangle au niveau de la poitrine, il peut s'avérer moins confortable pour les femmes en raison de leur morphologie. Enfin, les femmes SP sont plus susceptibles que leurs collègues hommes d'être atteintes de TMS (Nazari et al., 2020), l'utilisation d'un exosquelette pourrait donc être bénéfique pour elles, il paraît alors nécessaire de les inclure dans une future étude.

Pour finir, lors de l'expérimentation, il n'y avait pas de victime dans le véhicule, la tâche étant guidée avec une temporalité, le participant ne travaillait pas en situation d'urgence, et il n'y avait pas de collègues à proximité hormis celui qui le guidait. Il y avait donc des différences non négligeables

avec une situation réelle de désincarcération, ce qui a pu avoir un impact sur la charge cognitive et notamment l'exigence temporelle et mentale. Pour aller plus loin, une analyse située de l'usage de l'outil avec une méthode d'exploration qualitative nous permettrait d'étudier l'acceptation située.

Information complémentaire. Le lien suivant conduit vers une page d'OSF contenant des photos (situation expérimentale, tenu, outil, exosquelette) et le questionnaire d'acceptation développé pour ce travail : https://osf.io/87gnt/?view_only=48c489ad6e5c46b78453e95e89828350

5 BIBLIOGRAPHIE

- Barcenilla, J., & Bastien, J. M. C. (2009). L'acceptabilité des nouvelles technologies : quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur ? *Le travail humain*, 72(4), 311-331.
- Bequette, B., Norton, A., Jones, E., & Stirling, L. (2020). Physical and cognitive load effects due to a powered lower-body exoskeleton. *Human factors*, 62(3), 411-423.
- Bobillier-Chaumon, M. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22(1), 4-21.
- Bobillier-Chaumon, M., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle: quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain*, 72(4), 355-382.
- Bongers, P. M., Kremer, A. M., & Laak, J. T. (2002). Are psychosocial factors, risk factors for symptoms and signs of the shoulder, elbow, or hand/wrist?: A review of the epidemiological literature. *American journal of industrial medicine*, 41(5), 315-342.
- Cegarra, J., & Morgado, N. (2009). Étude des propriétés de la version francophone du NASATLX. In *EPIQUE 2009: 5ème Colloque de Psychologie Ergonomique* (pp. 233-239). France: Nice.
- Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). La charge cognitive : Théorie et applications. A. Colin.
- De Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'sullivan, L. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671-681.
- L'Assurance Maladie (2022) Rapport annuel 2021 - L'Assurance Maladie - Risques professionnels. L'Assurance Maladie, pp. 1-236.
- Larue, J. (2002). La charge mentale de travail. *Cahiers de l'INSEP*, 33(1), 99-113.
- Nazari, G., MacDermid, J. C., Sinden, K., & D'Amico, R. (2020). Prevalence of musculoskeletal symptoms among Canadian firefighters. *Work*, 67(1), 185-191.
- Puchaud, P. (2020). Modélisation musculo-squelettique générique et spécifique en vue du support de l'activité physique du soldat [Thèse de doctorat, École normale supérieure de Rennes].
- Stenger C. (2018). Essai de définition des critères anthropométriques au recrutement de sapeurs-pompiers volontaires : une étude qualitative [Thèse de doctorat, Université de Strasbourg].
- Theurel J, Claudon L. (2018). Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs état des connaissances. *INRS (ED 6311):32*.
- Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational exoskeletons: overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 264-280.
- Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. *MIS quarterly*, 425-478.
- Wioland, L., Debay, L., & Atain-Kouadio, J. (2019a). Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire. *Références en santé au travail*, 157, 45-61.
- Wioland, L., Debay, L., & Atain-Kouadio, J. (2019b). Processus d'acceptabilité et d'acceptation des exosquelettes : évaluation par questionnaire. *Références en santé au travail*, 160, 49-76.
- Zhu, Y., Weston, E. B., Mehta, R. K., & Marras, W. S. (2021). Neural and biomechanical tradeoffs associated with human-exoskeleton interactions. *Applied Ergonomics*, 96, 103494.