



HAL
open science

Travailler avec un robot collaboratif ou un exosquelette : Comment évaluer l'impact sur la santé physique et cognitive ?

Sophie Lemonnier, Kévin Bouillet, Elissa El Khalil, Pauline Maurice,
Guillaume Mornieux

► To cite this version:

Sophie Lemonnier, Kévin Bouillet, Elissa El Khalil, Pauline Maurice, Guillaume Mornieux. Travailler avec un robot collaboratif ou un exosquelette : Comment évaluer l'impact sur la santé physique et cognitive ?. Journée Technique Mesures Physiologiques et Études Utilisateurs, Aurélie Clodic (LAAS), Matthieu Herrb (LAAS), Pierre-Vincent Paubel (UT2J), Mathias Rihet (ISAE-Supaero), Sep 2024, Toulouse, France. hal-04705861

HAL Id: hal-04705861

<https://hal.science/hal-04705861v1>

Submitted on 24 Sep 2024

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.

Travailler avec un robot collaboratif ou un exosquelette : Comment évaluer l'impact sur la santé physique et cognitive ?

Sophie Lemonnier^{1,2}, Kévin Bouillet³, Elissa El Khalil^{1,2}, Pauline Maurice², Guillaume Mornieux³

¹Université de Lorraine, PErSEUs, F-57000 Metz, France

²Université de Lorraine, CNRS, Inria, LORIA, F-54000 Nancy, France

³Université de Lorraine, DevAH, F-54000 Nancy, France

● ● ● Notre question de recherche

- Impact des **technologies de l'Industrie 4.0** sur la santé des travailleurs ?

Robot Collaboratif (Cobot) :

- permet d'**interagir** (physiquement ou non) dans un espace de travail partagé,
- permet de prendre en charge certaines tâches coûteuses pour l'humain (pièces lourdes, gestes répétitifs...),
- Versus robot industriel : + léger, + petit, + facile à programmer, **flexibilité** +++.

[Tantawi2019; Terveen1995]

Exosquelette :

- apporte une **assistance physique** en compensant ou en augmentant les capacités motrices de celui qui le porte.

[deLooze2016 ; Theurel2019]



Notre question de recherche

- Impact des technologies de l'Industrie 4.0 sur la **santé des travailleurs** ?

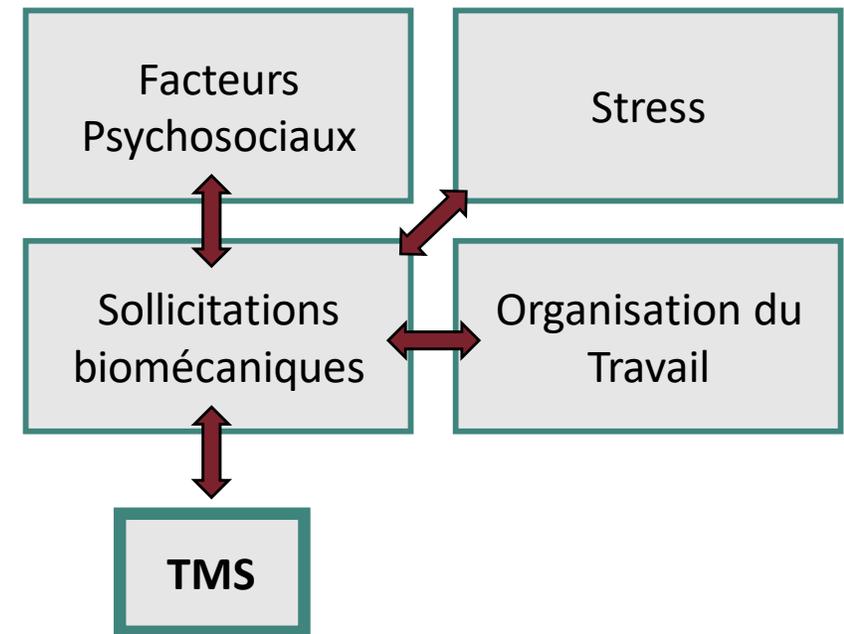
Santé physique et cognitive.



TMS (Troubles Musculosquelettiques) :

- douleurs et fatigue musculaire pouvant conduire à une incapacité chronique,
- **86% des MP** en France en 2021.

[AssuranceMaladie2022]



[Uguen2018]





Étude 1a :



Humain vs Cobot



34 (13 ♀), 22 ±2 ans



2h30



Assemblage



Étude 2 :



Fixe vs Changement
(±prédictible, grand)



15 (7 ♀), 32 ±9 ans



2h



Vissage



Étude 1b :



Leader vs Suiveur
(+ cadence)



20 (9 ♀), 22 ±2 ans



2h30



Assemblage



Étude 3 :



Avec vs Sans Exo



12 (0 ♀), 31 ±9 ans



3h



Désincarcération





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Capture de mouvement (Xsens MVN Link) :



⇒ Angles articulaires

⇒ **RULA**
(+ REBA)



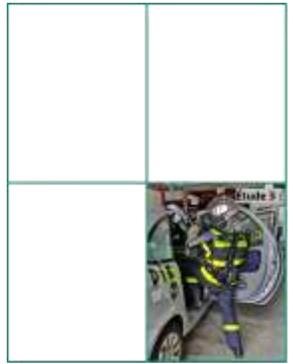
■ Charge **physique**
■ Charge **cognitive**

1-2	Risque négligeable, pas d'action.
3-4	Risque faible, un changement peut être nécessaire.
5-6	Risque moyen, enquêter, à améliorer bientôt.
7	Risque fort, à améliorer maintenant





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Capteurs EMG (Delsys Trigno Snap-Lead) :

Recommandations

Seniam : erector spinae (ES), latissimus dorsi (LD), anterior deltoid (AD), upper trapezius (TR), biceps brachii (BB), triceps brachii (TB) and brachioradialis (BR).



-  Charge **physique**
-  Charge **cognitive**





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Questionnaire Borg's CR-10 :

⇒ Effort perçu : cou, bras et avant-bras D&G, bas du dos, jambes.

0	Rien du tout	
0,3		
0,5	Extrêmement faible	À peine perceptible
0,7		
1	Très faible	
1,5		
2	Faible	Légère
2,5		
3	Modérée	
4		
5	Forte	Lourde
6		
7	Très forte	
8		
9		
10	Extrêmement forte	« Maximale »
11		
↖		
●	Maximum absolu	La plus forte possible

Borg CR10 - Alain®
© Gunnar Borg, 1962, 1998, 2004
French - Français

- Charge **physique**
- Charge **cognitive**



Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Une ou plusieurs cameras
(caméra QFHD Pro Series, GoPro) :

⇒ Codage via logiciel Captiv
*Temps d'activité et d'inactivité
(collaboration, coopération)*

⇒ Informations qualitatives
(confirmation entretiens)

■ Charge **physique**

■ Charge **cognitive**





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, ressources, charges.
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	



*Nombre de produits correctement assemblés
Nombre de visses vissées*

■ Charge **physique**

■ Charge **cognitive**



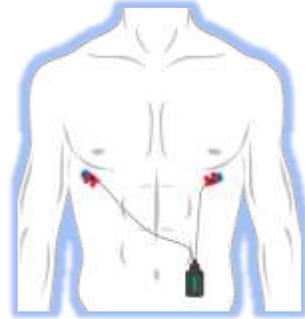


Les outils de mesures

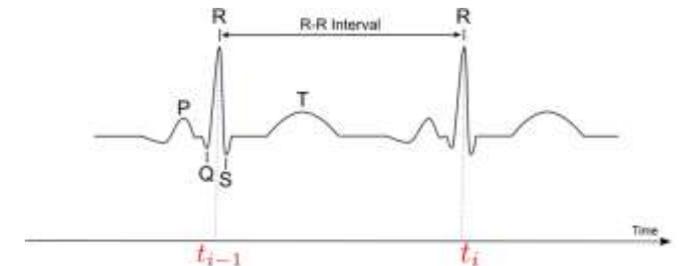


Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, ressources, charges.
ECG	... /du stress.
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Fréquence cardiaque (bandeau thoracique Garmin) :



- Moyenne
- Variabilité de la fréquence cardiaque (VFC)



- Charge **physique**
- Charge **cognitive**



VFC ↗ = stress ↘ = état de relaxation
 VFC ↘ = stress mental ↗ (mais pas que)





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, ressources, charges.
ECG	... /du stress.
NASA-TLX (QR)	... la charge de travail.
Oculomètre	
Double tâche	

Questionnaire NASA-TLX :

6 facteurs : Exigence mentale, physique et temporelle, Effort, Performance et Frustration.

Effort VS Performance	Exigence temporelle VS Frustration	Exigence temporelle VS Exigence physique
Exigence physique VS Frustration	Performance VS Frustration	Exigence physique VS Exigence temporelle
Exigence physique VS Performance	Exigence temporelle VS Exigence mentale	Exigence temporelle VS Performance
Performance VS Exigence mentale	Performance VS Exigence temporelle	Performance VS Effort
Exigence mentale VS Exigence physique	Exigence temporelle VS Exigence physique	Effort VS Exigence physique

EXIGENCE MENTALE : Quelle quantité d'activité mentale et perceptives a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. réfléchir, décider, chercher, etc.) ?

EXIGENCE PHYSIQUE : Quelle quantité d'activité physique a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. pousser, déplacer, tourner, manipuler, etc.) ?

EXIGENCE TEMPORELLE : Quelle pression temporelle avez-vous ressentie durant l'exécution de la tâche ? Faillait-il gérer la réalisation de la tâche de manière lente (pression temporelle faible) ou de manière rapide (pression temporelle forte) ?

PERFORMANCE : Comment estimez-vous votre performance en ce qui concerne la réalisation de la tâche ? (Quel est votre niveau de satisfaction concernant votre performance ?)

EFFORT : Quel effort (mental et physique) avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ?

FRUSTRATION : Vous êtes-vous senti satisfait, content, relax (=niveau de frustration faible) ou plutôt ennuyé, irrité, stressé (= niveau de frustration élevé) pendant la réalisation de la tâche ?



Se fait en deux temps :
 1/ **valence** de chaque facteur ;
 2/ **poids** de chaque facteur.

- Charge **physique**
- Charge **cognitive**





Les outils de mesures

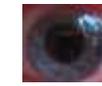
Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, ressources, charges.
ECG	... /du stress.
NASA-TLX (QR)	... la charge de travail.
Oculomètre	... l'effort cognitif et la fatigue.
Double tâche	



Oculomètre ou *Eye-tracker* (lunettes Tobii) :

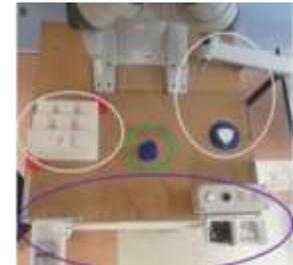


- Diamètre pupillaire



- Exploration visuelle

- (AOI)



Diamètre pupillaire ↗ = **Charge mentale** ↗
 Durée fixation ↘ + Amplitude saccade ↗ =
 exploration visuelle ↗ ≈ **Difficulté tâche** ↗

■ Charge **physique**
 ■ Charge **cognitive**





Les outils de mesures



Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, ressources, charges.
ECG	... /du stress.
NASA-TLX (QR)	... la charge de travail.
Oculomètre	... l'effort cognitif et la fatigue.
Double tâche	... /des ressources cognitives disponibles.

Une seconde tâche cognitive :

- N'utilisant pas les mêmes modalités sensorielle et motrices,
- Qui est réalisé en parallèle de la tâche principale.



 Charge **physique**
 Charge **cognitive**

⇒ Performance double tâche \searrow = **ressource cognitive** \swarrow = charge cognitive \nearrow





Résultats / bilan



Outils de mesures	Étude 1a Humain -> Cobot	Étude 1b Leader + Cadence ↗	Étude 2 Fixe -> Changement	Étude 3 Sans -> Avec Exo
Cinématique (RULA)		ns		
Activité musculaire (EMG)				ns
Borg (Questionnaire)				
Codage vidéo		ns	posture	posture
Performance		ns	ns	
ECG		ns ns	ns	ns
NASA-TLX (QR)		ns		
Oculomètre	()		ns	ns
Double tâche		ns		

↓
Avec cobot :
- effort physique ≈,
- effort cognitif ↗.

↓
Leader : aucun effet;
↗ cadence imposée :
- effort physique ↗,
- effort cognitif ↗.

↓
Imposer un changement
de posture :
- effort physique ↘,
- effort cognitif =.

↓
Porter un exosquelette:
- effort physique ≈,
- effort cognitif ≈.
Mais effet placebo ?



Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Facile à interpréter,
- Permet d'observer les effets recherchés,
- Effets semblables avec angles articulaires (robuste ?).

Inconvénients :

- Un peu long à installer (si combinaison, besoin d'une cabine),
- Critique ++ la généralisation (parler de TMS avec juste 1h de manip).





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Mesure très fine vraiment au niveau des muscles.

Inconvénients :

- Très lourd à installer (besoin d'un espace spé, effet panda rebute participants),
- Nécessite une expertise ++ (installation + interprétation).





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Facile à mettre en place et léger pour participant,
- Possibilité de répétitions ++,
- Discriminant.

Inconvénients :

- Selon question de recherche, peut-être trop spé et être redondant avec le NASA,
- Limites intrinsèques aux mesures indirectes.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Facile à installer (la vidéo),
- Très riche, permet d'interpréter / confirmer / comprendre résultats observés par ailleurs,
- Peut servir de contrôle (sécurité ++).

Inconvénients :

- Pour vidéo, question de stockage et de comité d'éthique,
- Pour codage, long à réaliser, nécessite d'être au clair avec ? de recherche.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	Indispensable, si tâche s'y prête
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Permet d'avoir une évaluation globale de la situation,
- Facile à recueillir (liée à la tâche),
- Fait le pont avec littérature / communauté plus écologique.

Inconvénients :

- Parfois peu discriminant (ou augmenter granularité mais en ajoutant du travail à l'expérimentateur),
- Difficile à interpréter.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	Indispensable, si tâche s'y prête
ECG	Conseillé (variabilité), si tâche s'y prête
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Pas trop compliqué à installer (participant peut faire seul),
- Peut être discriminant (hypo plus liée au stress dans étude 2).

Inconvénients :

- Permet pas de distinguer stress physique et cognitif, peut être difficile à interpréter.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	Indispensable, si tâche s'y prête
ECG	Conseillé (variabilité), si tâche s'y prête
NASA-TLX (QR)	Conseillé
Oculomètre	
Double tâche	

Avantages :

- Pas trop long à remplir,
- Discriminant,
- Données quantitative et qualitative (dimension + poids), permet de proposer des interprétations riches.

Inconvénients :

- Attention au nombre de répétitions,
- Limites intrinsèques aux mesures indirectes.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	Indispensable, si tâche s'y prête
ECG	Conseillé (variabilité), si tâche s'y prête
NASA-TLX (QR)	Conseillé
Oculomètre	Conseillé si ? spé. attention visuelle
Double tâche	

Avantages :

- Pas trop compliqué à installer,
- Riche, interprétation +++, diamètre pupillaire et exploration visuelle donne des infos très différentes et complémentaires.

Inconvénients :

- Traitement compliqué, long,
- Peu discriminant si tâche pas spé,
- Nécessite d'adapter un peu le protocole expé (contrôler luminosité, penser les zones contenant de l'info),
- Soit cher, soit nécessite une partie développement / appropriation ++.





Résultats / bilan

Outils de mesures	Bilan (très personnel) sur les métriques
Cinématique (RULA)	Bon compromis
Activité musculaire (EMG)	A éviter sauf si vraiment nécessaire
Borg (Questionnaire)	Conseillé si ? spé. effort physique
Codage vidéo	Vidéo indispensable, codage à réfléchir
Performance	Indispensable, si tâche s'y prête
ECG	Conseillé (variabilité), si tâche s'y prête
NASA-TLX (QR)	Conseillé
Oculomètre	Conseillé si ? spé. attention visuelle
Double tâche	Conseillé si ? spé. ressources cog

Avantages :

- Meilleur indicateur objectif des ressources cog disponibles.

Inconvénients :

- Nécessite de modifier la tâche, impacte tout le protocole,
- Critique lié à tâche écologique.



Conclusion

- Multiplier les mesures **complémentaires** :
 - **Directe / indirecte** (eg, capteur [EMG] et questionnaire [Borg]),
 - **Quantitative / qualitative** (eg, score [perf] et description [codage vidéo]),
 - Différents niveaux de **confiance** et d'**interprétation** (souvent, quand confiance \nearrow , richesse \searrow), (eg, robuste mais peu discriminant [FC] et biaisé mais très riche [NASA]),
 - Ajouter un **entretien semi-directif**.



MERCI DE VOTRE ATTENTION !!!

- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanche, F., & Gauchard, G. (2023a). Does the introduction of a cobot change the productivity and posture of the operators in a collaborative task? *Plos one*, 18(8), e0289787.
- Bouillet, K., Lemonnier, S., Clanché, F., & Gauchard, G. (2023b). Influence de la cadence de production lors d'une situation collaborative humain-cobot sur les performances de travail et la santé de l'opérateur. In *Proceedings of the 34th Conference on l'Interaction Humain-Machine* (pp. 1-14).
- 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.
- El Khalil, E., Lemonnier, S. & Maurice, P. *Effect of Induced Postural Changes on Cognitive Load*. European Conference on Cognitive Ergonomics (ECCE2024), Paris, France, octobre 2024.
- Khalid Hasan Tantawi, Alexandr Sokolov, and Omar Tantawi. 2019. Advances in industrial robotics : From industry 3.0 automation to industry 4.0 collaboration. In 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON). IEEE, 1-4.
- L'Assurance Maladie (2022) Rapport annuel 2021 -L'Assurance Maladie -Risques professionnels. L'Assurance Maladie, pp. 1-236.
- Lemonnier, S., Cavagnac, L., Kohili, N., Bouillet, K., Maurice, P., & Mornieux, G. *Sapeurs-pompiers et désincarcération : effet du port d'un exosquelette sur la charge cognitive et l'acceptation*. 12e Colloque de Psychologie Ergonomique EPIQUE, Paris, France, juillet 2023.
- Terveen, L. G. (1995). Overview of human-computer collaboration. *Knowledge-Based Systems* 8, 2-3 (1995), 67-81.
- Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational exoskeletons: overview of their benefits and limitations in preventing work-related musculoskeletal disorders. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7(3-4), 264-280.
- Uguen, C., Sablon, S., & Carballeda, G. (2018). Intégration de la préparation physique dans l'approche ergonomique: quel dispositif pour quel (s) objectif (s)?. *Activités*, (15-2).

