

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



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE



● ● ● 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** ?

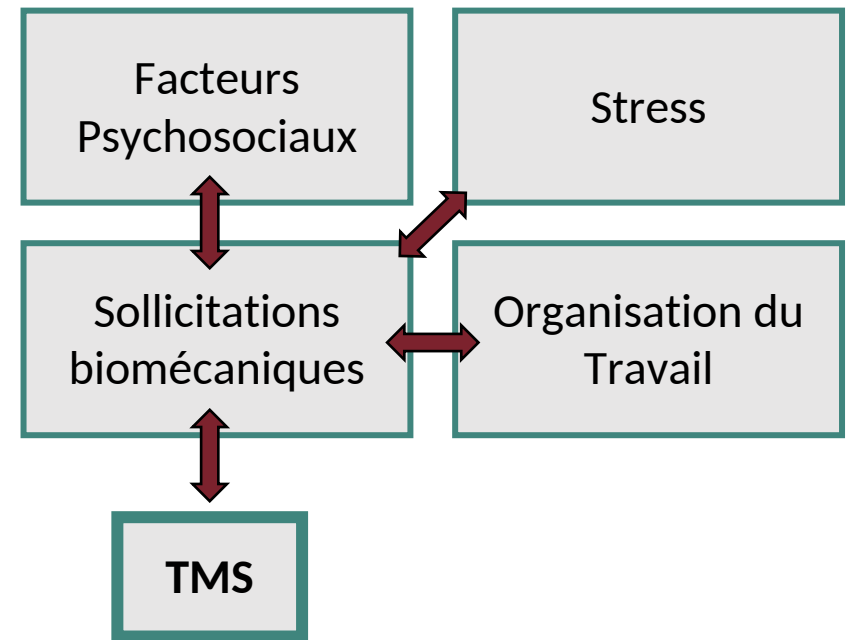
Santé physique et cognitive.



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 1b :

 Leader vs Suiveur
(+ cadence)


 20 (9♀), 22 ±2 ans


 2h30

 Assemblage



Étude 2 :

 Fixe vs Changement
(±prédictible, grand)

 15 (7♀), 32 ±9 ans


 2h

 Vissage




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)	
Activité musculaire (EMG)	
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double 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)	
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	
Double tâche	

Capture de mouvement (Xsens MVN Link) :



⇒ Angles articulaires

⇒ **RULA**
(+ REBA)

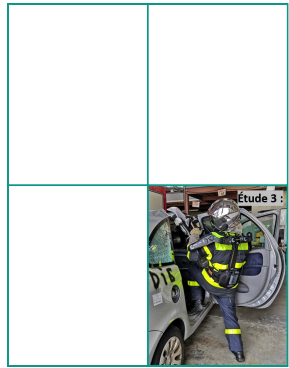


■ Charge **physique**
■ Charge **cognitive**

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



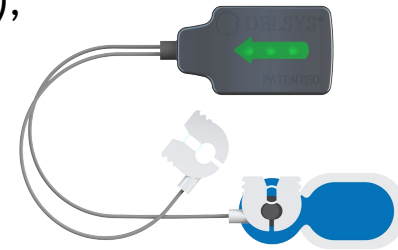
Les outils de mesures



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

■ 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**



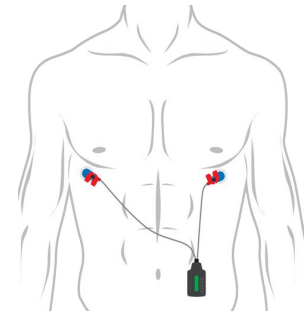


Les outils de mesures

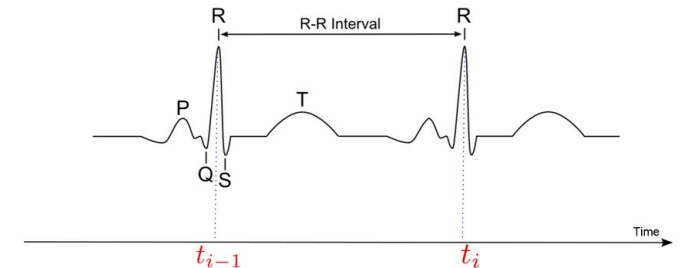


Outils de mesures	Interprétation : permet une évaluation de ...
Cinématique (RULA)	... la posture -> risque TMS ?
Activité musculaire (EMG)	... l'effort musculaire.
Borg (Questionnaire)	... l'effort physique perçu.
Codage vidéo	... la qualité des interactions (+ contrôle).
Performance	... /des capacités, 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 Frustration EXIGENCE MENTALE : Quelle quantité d'activité mentale et perceptive a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. réfléchir, décider, chercher, etc.) ? [Progression bar] Faible Elevée
Exigence physique VS Frustration	Performance VS Frustration	EXIGENCE PHYSIQUE : Quelle quantité d'activité physique a été nécessaire pour réaliser la tâche (par ex. pousser, déplacer, tourner, manipuler, etc.) ? [Progression bar] Faible Elevée
Exigence physique VS Performance	Exigence temporelle VS Exigence mentale	EXIGENCE TEMPORELLE : Quelle pression temporelle avez-vous ressentie durant l'exécution de la tâche ? Fallait-il gérer la réalisation de la tâche de manière lente (pression temporelle faible) ou de manière rapide (pression temporelle forte) ? [Progression bar] Faible Elevée
Performance VS Exigence mentale	Performance VS Exigence temporelle	PERFORMANCE : Comment estimez-vous votre performance en ce qui concerne la réalisation de la tâche ? (Quel est votre niveau de satisfaction concernant votre performance ?) [Progression bar] Bonne Mauvaise
Exigence mentale VS Exigence physique	Effort VS Exigence physique	EFFORT : Quel effort (mental et pphysique) avez-vous dû fournir pour atteindre votre niveau de performance ? [Progression bar] Faible Elevée
		FRUSTRATION : Vous êtes-vous senti satisfait, content, relaxé (=niveau de frustration faible) ou plutôt ennuyé, irrité, stressé (= niveau de frustration élevé) pendant la réalisation de la tâche ? [Progression bar] Faible Elevée



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) :

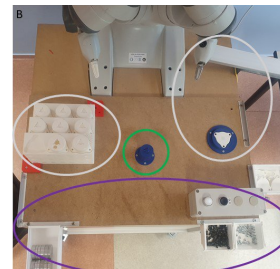


- Diamètre pupillaire



- 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.



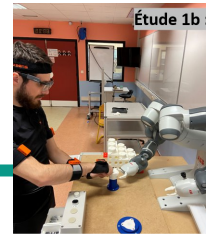
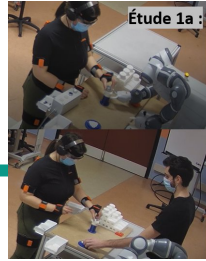
 Charge **physique**
 Charge **cognitive**

⇒ Performance double tâche ↘ = **ressource cognitive** ↘ = charge cognitive ↗





Résultats / bilan



Outils de mesures	Étude 1a Humain -> Cobot
Cinématique (RULA)	
Activité musculaire (EMG)	
Borg (Questionnaire)	
Codage vidéo	
Performance	
ECG	
NASA-TLX (QR)	
Oculomètre	()
Double tâche	



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 ↗, richesse ↘), (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).

