



HAL
open science

Efficacité d'un exosquelette pour lutter contre les troubles musculo-squelettiques : évaluation de l'impact sur la fatigue et sur la pénibilité

Thomas Visdominé

► To cite this version:

Thomas Visdominé. Efficacité d'un exosquelette pour lutter contre les troubles musculo-squelettiques : évaluation de l'impact sur la fatigue et sur la pénibilité. Médecine humaine et pathologie. 2020. dumas-03125254

HAL Id: dumas-03125254

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03125254v1>

Submitted on 29 Jan 2021

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.

AIX-MARSEILLE UNIVERSITÉ
ÉCOLE DES SCIENCES DE LA RÉADAPTATION
FORMATION EN MASSO-KINÉSITHÉRAPIE

**EFFICACITE D'UN EXOSQUELETTE POUR
LUTTER CONTRE LES TROUBLES MUSCULO-
SQUELETTIQUES :
ÉVALUATION DE L'IMPACT SUR LA FATIGUE
ET SUR LA PENIBILITE**

VISDOMINÉ Thomas

Directeur de mémoire : Mme CAORS Béatrice

Remerciements

Je tiens, tout d'abord, à remercier ma directrice de mémoire, Béatrice Caors, pour la confiance qu'elle a pu me témoigner tout au long de mes années de formation, et plus particulièrement pendant la rédaction de ce mémoire.

Je remercie mes proches et mes amis, qui m'accompagnent et me soutiennent.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance aux auteurs des publications analysées ici. Ils ont eu l'immense amabilité de donner suite à mes interrogations et à mes mails avec une bienveillance inespérée.

Merci à Jason Gillette, Maury Nussbaum et Saad Abdulkarim.

Enfin, mention spéciale à mon compagnon de confinement, mon ordinateur, qui est resté jusqu'au bout en bon état de marche, repoussant héroïquement sa fin et son obsolescence imminente.

Table des matières

1. Contextualisation	1
2. Introduction	2
2.1 Les troubles musculo-squelettiques	2
2.1.1 Économie et santé publique.....	2
2.1.2 Facteurs de risques	3
2.2 L'exosquelette, une technologie émergente.....	5
2.2.1 Augmentation et préservation	6
2.2.2 Réhabilitation	7
2.2.3 Directions	9
2.3 L'exosquelette passif du membre supérieur – EPMS.....	10
2.3.1 Description	10
2.3.2 Mécanique.....	11
2.4 L'épaule au travail, une zone fragile dans un contexte traumatique.....	12
2.4.1 Overhead work, en usine automobile.....	12
2.4.2 L'épaule, une zone ciblée.....	14
2.5 Modèle d'évaluation des EPMS	17
2.6 Objectif de la revue de littérature	20
2.6.1 Modèle PICO.....	20
3. Méthode	21
3.1 Critères d'éligibilité des études	21
3.1.1 Types d'études retenues	21
3.1.2 Population	21
3.1.3 Intervention.....	21
3.1.4 Comparateur	21
3.1.5 Critères de jugement.....	22
3.2 Méthodologie de recherche	22
3.2.1 Mots-clés.....	22
3.2.2 Équation de recherche	23
3.2.3 Sources documentaires investiguées.....	23
3.3 Extraction et analyse des données	24
3.3.1 Critères d'inclusion	24
3.3.2 Critères d'exclusion.....	24
3.3.3 Extraction des données	24
3.3.4 Évaluation de la qualité méthodologique des études sélectionnées.....	25
4. Résultats	26
4.1 Caractéristiques des études.....	26
4.1.1 Diagramme de flux.....	26
4.1.2 Études exclues	27
4.2 Préambule	28
4.3 Études incluses	29
4.4 Risque de biais des études incluses	34
4.4.1 Grille d'analyse utilisée	34
4.4.2 Synthèse des biais identifiés.....	34

5. Discussion	36
5.1 Une hétérogénéité importante.....	36
5.2 Analyse des résultats.....	37
5.2.1 Anthropométrie.....	37
5.2.2 Muscles agonistes.....	40
5.2.3 Muscles antagonistes.....	41
5.2.4 Une assistance idéale.....	42
5.2.5 Hauteur de tâche	43
5.2.6 Rating of Perceived Discomfort	44
5.2.7 Habilité.....	45
5.2.8 Réduction des contraintes rachidiennes	46
5.2.9 Autres notions	47
5.3 Applicabilité sur le terrain	47
5.4 Recherches futures.....	49
5.5 Biais potentiel de la revue	50
6. Conclusion	51
7. Bibliographie	54
8. Annexes	59
Abstract	65

1. Contextualisation

La santé est une source de préoccupation qui pousse au progrès de la médecine et de la technologie, véritables outils au service de nos besoins et de nos modes de vie. L'amélioration du confort personnel et de la longévité sont des obsessions purement humaines qui peuvent être jugées légitimes quand cela concerne le droit à une bonne santé et au bien-être. Certains fantasment même sur l'idée d'un homme « augmenté », avec des capacités décuplées et aux pouvoirs spéciaux : *porter, courir, nager et même voler ; plus fort, plus vite, plus loin...*

Les progrès en matière d'informatique, d'électronique et de robotique ont permis d'introduire dans notre quotidien davantage de machines et de robots, qui nous soulagent des tâches ménagères et professionnelles les plus contraignantes. Dans les secteurs industriels, on assiste à une robotisation et une mécanisation massive des tâches, qui permettent une diminution de la pénibilité et de l'exigence physique, mais valorisent également une vision productiviste du travail (performance et rendement).

Le modèle économique et la mondialisation font peser sur les entreprises et sur les travailleurs de fortes contraintes de productivité avec une diminution de la flexibilité des postes. L'accroissement de la pénibilité du travail est une réalité contemporaine, à travers *le travail à la chaîne, les tâches répétitives, cadencées par la machine* ou bien *la manutention de charges lourdes*. Dans ce contexte d'intensification du travail et de vieillissement de la population active, les ouvriers sont victimes d'une « épidémie » de troubles musculo-squelettiques dont l'impact sanitaire et économique est considérable.

Face à cet enjeu majeur de santé publique, la réglementation du travail et la prévention jouent un rôle primordial dans le maintien en bonne santé de cette population vulnérable. Dans certaines situations, la tâche professionnelle reste bien trop pénible, bien trop physique, et les solutions de prévention et d'ergonomie proposées ne sont pas toujours en mesure de réduire l'exposition aux facteurs de risques.

C'est dans ce contexte que de nouveaux types de dispositifs mécaniques visant à réduire les troubles musculosquelettiques ont vu le jour : les exosquelettes.

Parmi ces dispositifs ergonomiques, le type d'exosquelette le plus utilisé est un appareil d'assistance physique de l'épaule qui promet de réduire la fatigue musculaire et l'apparition de pathologies musculo-squelettiques.

Cette revue de littérature se concentrera sur la validation de l'efficacité de ce type d'appareil à travers une observation objective de leur impact sur la fatigue et la pénibilité.

2. Introduction

2.1 Les troubles musculo-squelettiques

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) regroupent une large famille d'affections douloureuses de l'appareil locomoteur qui sont provoquées, aggravées, ou maintenues par l'activité professionnelle.

Ils se manifestent quand les capacités fonctionnelles et de récupération de l'individu sont dépassées par les sollicitations biomécaniques.

Ciblant principalement les tissus mous (muscles, fascias, nerfs, ligaments, cartilages), les TMS se traduisent par une gêne fonctionnelle souvent accompagnée de douleurs récurrentes, voire quotidiennes. Le terme TMS apparaît comme une appellation « parapluie » qui regroupe aussi bien les myalgies que des affections bien médicalement codifiées. Les affections du membre supérieur apparaissent les plus fréquemment comme, entre autres : *le syndrome de la coiffe des rotateurs, les bursites, les capsulites rétractiles, les ténosynovites, les tendinopathies épicondyliennes, les syndromes canauxaires, l'arthrose* [1].

Le principal risque des TMS réside dans la chronicité potentielle et le handicap fonctionnel qu'ils sont susceptibles de causer. En effet, si les TMS aigus (< à 4 semaines) et subaigus (entre 4 à 12 semaines) sont généralement de pronostic favorable, les TMS chroniques (> à 3 mois) entraînent un risque élevé d'incapacité au travail. Les formes sévères peuvent entraîner une réduction importante des capacités fonctionnelles, jusqu'à une incapacité totale à réaliser des activités gestuelles professionnelles dans les formes chroniques majeures [2].

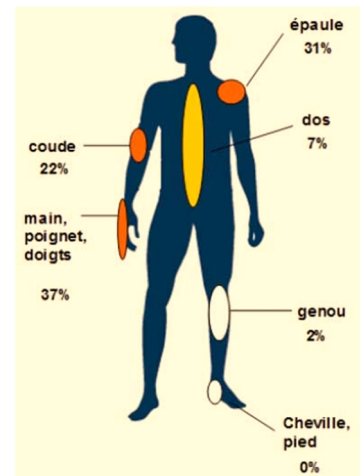


Figure 1 : Répartition par localisation des TMS reconnus en MP (Source Ameli) [46]

2.1.1 Économie et santé publique

Les TMS représentent un coût économique considérable et constituent un enjeu majeur de santé publique pour les pays industrialisés. En 2015, en France, les TMS ont représenté plus de 87 % des maladies professionnelles et ainsi la première cause de perte de journée de travail avec plus de dix millions de journées perdues (Source CNAM-TS) [3].

La répercussion des TMS sur les entreprises est considérable avec des coûts directs (médicaux, administratifs, indemnités, assurances) et aussi des coûts indirects (baisse de performance, de productivité et de qualité, recrutement de nouveau personnel, dégradation de l'image de l'entreprise)[4]. En 2011, en France, les TMS ont engendré la perte de 10,4 millions de journées de travail et 1,02 milliard d'euros couverts par les cotisations des entreprises.

Les coûts indirects qui sont difficilement calculables, ont tout de même été estimés par l'ANACT¹ comme étant doublé, voir triplé par rapport au coût direct.

Le coût global des TMS avoisinerait 1,5 % du P.I.B. européen (Source CNAM-TS).

Les TMS représentent donc une véritable problématique de santé au travail du fait d'un coût économique et humain considérable. Dans un contexte de compétition économique et de vieillissement de la population active, l'intensification des conditions de travail et des contraintes sur le travailleur est une réalité actuelle. La lutte contre les TMS passe par la nécessité d'une mobilisation des acteurs de la prévention (pouvoirs publics, entreprise, partenaires sociaux) et des professionnels de soins à travers la mise en place d'une politique coordonnée [2].

2.1.2 Facteurs de risques

Les TMS sont des affections multifactorielles faisant intervenir des facteurs professionnels de niveau de risque variable, tels que les facteurs biomécaniques, psychosociaux, ceux liés à l'organisation du travail mais également des facteurs de susceptibilité individuelle² [2].

2.1.2.1 Facteurs mécaniques et environnementaux

Les facteurs mécaniques et environnementaux représentent le premier niveau de risque à considérer.

Les tâches physiques et les contraintes environnementales exposent l'opérateur à un stress biomécanique, une hypersollicitation des tissus. Parmi celles qui ont été mises en évidence, il y a les contraintes posturales prolongées, les mouvements de force et/ou répétés, les positions articulaires extrêmes, mais également les chocs et les impacts, les températures extrêmes, un environnement vibratoire, bruyant et sombre [4].

Pour analyser les conséquences d'un risque mécanique sur un individu, il est très important de mesurer l'intensité, la fréquence, ainsi que la durée de l'exposition du sujet à ce risque [5].

Par ailleurs, la qualité des locaux et l'ergonomie du poste de travail rentrent en compte dans l'impact de l'environnement de travail sur la santé du travailleur.

¹ Agence National pour l'Amélioration des Conditions de Travail

² Cf. Annexe, Figure A. Cette figure regroupe tous les déterminants des TMS dans une présentation par stratification

2.1.2.2 Facteurs psycho-sociaux

Les facteurs psycho-sociaux sont considérés comme ayant un impact modéré sur les TMS, ils représentent un niveau moyen de risque [6].

Chaque situation perçue comme menaçante, frustrante ou conflictuelle peut générer un stress psychique, qui lui-même, peut créer un stress biomécanique [6] ; il faut considérer l'esprit et le corps comme un ensemble indissociable. Le stress représente un effort d'adaptation à une agression, et le lien entre stress et TMS n'est maintenant plus à démontrer [7]. Une mauvaise ambiance de travail, de la concurrence, des comportements individualistes, un manque d'autonomie, de soutien ou de reconnaissance sont autant de facteurs psychiques susceptibles d'augmenter la charge mentale et le stress.

2.1.2.3 Facteurs individuels

Enfin, les facteurs individuels représentent le niveau de risque minimal.

Des facteurs comme l'âge et les antécédents médicaux présentent une forte corrélation avec les TMS, mais il semblerait que cela soit dû à leur influence sur les facteurs biomécaniques. Avec l'âge, la durée d'exposition aux facteurs de risques augmente. La capacité fonctionnelle des tissus mous est dépassée, en parallèle d'une diminution progressive de la force musculaire [5]. Enfin, il a été montré que les facteurs génétiques ou anthropométriques sont peu prédictifs d'une susceptibilité pathologique [6].

Par ailleurs, chaque individu possède une méthode de travail avec des stratégies motrices qui lui sont propres, en lien direct avec des variations interpersonnelles du schéma moteur et de la somatotopie. Enfin, la prévention joue un rôle crucial dans la préservation d'une bonne santé au travail. Les connaissances et les formations en matière de prévention, de manutention et les bonnes pratiques à adopter, sont autant d'éléments indispensables à une prise de conscience des risques professionnels des troubles musculosquelettiques.

À l'instar de la robotique déjà présente sur de nombreux sites industriels, on assiste aujourd'hui à l'émergence de nouveaux dispositifs mécaniques d'assistance physique dans les entreprises. Dans un cadre professionnel, ces exosquelettes promettent de réduire l'impact de l'exposition aux facteurs de risques biomécaniques, et font naître un espoir d'amélioration des conditions de travail et de la santé du travailleur.

2.2 L'exosquelette, une technologie émergente

Les progrès dans les domaines de l'informatique, l'électronique et de la mécanique ont permis l'apparition d'un nouveau type de technologie, issu de la rencontre entre l'ingénierie, l'ergonomie et la médecine.

L'exosquelette (Exo) ou squelette externe, est un dispositif mécanique, essentiellement revêtu pour tenir près du corps, permettant d'apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par l'augmentation de ses capacités ou par une compensation de ses efforts. En fait, l'Exo peut en quelque sorte être considéré comme une orthèse évoluée [8] ; il y a création d'une interface entre la partie du corps et l'appareil. L'homme est l'entité intelligente qui commande alors que la machine est asservie à son assistance, ce qui nécessite un excellent calibrage et une robotique rapide et précise [9].

Historiquement, le premier brevet d'Exo fut délivré en 1890 à *Nicholas Yagn* qui avait imaginé un système capable d'accroître la vitesse de course des fantassins de l'armée russe (bien qu'il n'existe aucune preuve de sa fabrication et de son bon fonctionnement). Les deux grandes lames métalliques courbes ont été conçues pour encaisser les forces de compression appliquées sur les membres inférieurs pendant la phase d'appui au sol, puis restituer l'énergie au moment de l'impulsion [10].

Quel que soit l'Exo que l'on observe, c'est toujours sa fonction qui détermine ses caractéristiques, comme la partie du corps concernée, les matériaux utilisés, le(s) type(s) d'énergie(s) utilisée(s) et sa forme. Dès qu'il existe un besoin d'assistance physique, c'est une application potentielle pour un exosquelette.



Figure 2 : Croquis du prototype d'Exo de Nicholas Yagn

Pour mieux comprendre leur fonctionnement, il est important de distinguer les Exos selon le type d'énergie qu'ils utilisent. Il y a les passifs et les actifs.

Les Exos actifs, sont aussi appelés robots d'assistance physique, et utilisent un système motorisé alimenté par une source d'énergie externe. Ils sont en général plus coûteux et également plus lourds, du fait du poids de composants comme la batterie³, le système électronique ainsi que les matériaux résistants. Le mouvement des différents axes de l'Exo est initié par la détection d'une intention de mouvement du porteur, à travers, bien souvent, des électrodes pour détecter l'activité musculaire ou bien de simples capteurs de pression et de contact. Un système électronique central (une puce ou un mini-ordinateur) va traiter l'information avant d'envoyer la commande à un effecteur (moteur).

L'Exo ne doit en aucun cas commander l'homme, c'est l'homme qui contrôle ses actions et la machine qui doit le suivre avec transparence et un temps de réaction le plus court possible (de l'ordre de la milliseconde)[11]. Un excellent calibrage avec le sujet est nécessaire pour assurer sa sécurité en évitant les risques mécaniques liés à l'interaction homme et robot. Et ces risques ne sont pas inexistantes. Entre autres, il existe de nombreux risques induits par le décuplement des capacités physiques, comme les chocs, coincements, écrasements et les

³ Le poids trop important des batteries représente un des blocages majeurs au développement des Exos actifs.

dépassements des plages articulaires et fonctionnelles physiologiques. Il existe aussi des risques thermiques et énergétiques propres aux appareils motorisés [12].

Les Exo passifs sont des dispositifs d'assistance physique. Ils assistent généralement leur porteur dans le maintien d'une bonne posture ou la réalisation d'un mouvement fatigant [13]. Cette assistance provient d'une restitution d'énergie mécanique corporelle stockée par des systèmes de type ressort, élastique ou bien hydraulique. Il n'y a ni batterie ni moteur. Ils sont donc considérablement plus légers et souvent moins chers que les actifs. Ils génèrent également moins de risques et sont plus faciles à mettre en œuvre in-situ, ce qui explique en partie leur prédominance sur le marché actuel.

Grossièrement, on peut répartir les Exo selon deux fonctions principales différentes.

2.2.1 Augmentation et préservation

C'est le domaine d'action des exosquelettes industriels et militaires. Ici, l'objectif est de renforcer, d'amplifier, des capacités déjà existantes et/ou garantir la sécurité et l'autonomie d'un individu apparemment « sain ». Le but de l'amplification est de donner à un individu des capacités physiques ou perceptives qu'il ne pourrait pas acquérir sans l'exosquelette. Les amplifications peuvent concerner la force musculaire, la vitesse de mouvement, la précision des gestes, le guidage d'outils de travail et la perception [11].

L'armée est bien souvent à l'origine des progrès scientifiques ou technologiques, et cela ne déroge pas pour les EXOS. L'application militaire constitue leur application historique d'origine. Aujourd'hui la perspective d'un « super-soldat augmenté » est étudiée et suscite l'intérêt des grandes puissances militaires internationales dans la course à l'armement.


 En 2012, la PME française RB3D, soutenue par le financement du ministère de la Défense, a développé Héraclès®, un Exo permettant à son porteur d'embarquer jusqu'à une centaine de kilos et cela même pour un rythme de marche soutenue [14].



Figure 3 : Héraclès® de RB3D (Source INRS [18])


 En 2013, le commandement des forces spéciales américaines a présenté TALOS®⁴, un concept d'exosquelette de combat comprenant entre autres, un système d'augmentation physique des membres supérieurs et inférieurs, un recouvrement pare-balles intégral, des outils de communication et des capteurs de constantes corporelles ainsi que des outils d'augmentation perceptive grâce à de



Figure 4 : TALOS®, le prototype d'exosquelette intégral

⁴ Tactical Assault Light Operator Suit

nombreux capteurs et caméras, avec une interface visuelle de dernière génération, et un ordinateur intégré.⁵

L'augmentation humaine a également un intérêt pour les entreprises du secteur industriel qui cherchent à assister les travailleurs dans leurs tâches professionnelles. L'objectif principal est la diminution de la pénibilité et de l'impact sanitaire et financier des TMS. L'Exo est un outil de maintien dans l'emploi en limitant la charge physique mais aussi en considérant le vieillissement et les handicaps au travail [15].

Dans certaines situations, quand les démarches de prévention atteignent leurs limites, l'Exo peut avoir une utilité dans des tâches où la charge physique est trop importante mais où il y a toujours la nécessité de garder le contrôle conscient et l'analyse cognitive humaine. Quoiqu'il en soit, leur introduction in-situ, dans un contexte professionnel réel, doit toujours être précédée d'une analyse ergonomique personnalisée poussée du poste et de l'environnement de travail [15].

Les Exos ne doivent en aucun cas être considérés comme une solution miracle systématique, mais ils peuvent se montrer très prometteurs dans la lutte contre les postures inadaptées et la fatigue physique au travail.



Chairless Chair[®] ou « la chaise sans chaise » créée par Gobio-Robot est un EXO passif qui propose une assise portative pour le travailleur, grâce à un système autobloquant qui n'entrave pas pour autant la marche [16].



Figure 5 : *Chairless Chair*[®] par Gobio-Robot (Source Noonee)

2.2.2 Réhabilitation

Contrairement à l'augmentation, l'Exo est ici destiné à une personne qui n'est pas saine. Le public cible est vaste car il regroupe potentiellement toute personne présentant des déficits et des incapacités fonctionnelles, chroniques ou non (handicaps, maladies et pathologies neuromusculaires, pathologies de l'appareil locomoteur). L'utilisation des Exos à des fins thérapeutiques ou rééducatives est une perspective très intéressante et prometteuse. Il existe deux « sous-catégories » presque identiques mais avec tout de même une faible nuance à bien distinguer.

D'une part, l'Exo peut permettre de suppléer un déficit fonctionnel dans les pathologies chroniques. Dans ce sens, on peut le considérer comme une « orthèse évoluée », ou une aide technique, qui permet d'apporter plus de confort et d'autonomie dans la vie quotidienne du patient.

⁵ Aujourd'hui, la stagnation de la technologie des batteries a mis un frein considérable au projet TALOS qui ne parvient ni à alléger son poids, ni à le rendre autonome assez longtemps.

💡 BIOM[®], la prothèse de jambe créée par Hugh Herr⁶, chercheur et directeur du laboratoire de biomécatronique du MIT⁷, est ce qu'on peut faire de plus poussé en terme de prothèse robotisée : manchon synthétique à densité variable pour épouser parfaitement le moignon, cheville bionique qui s'adapte aux variations de terrain et de vitesse (escaliers, pentes, course) [17].



Figure 6 : Hugh Herr et ses deux prothèses BIOM. (Source Office Européen des Brevets)

D'autre part, s'il est bien conçu et bien utilisé, l'Exo peut devenir un véritable outil thérapeutique et trouve son utilité dans la prise en charge kinésithérapique, dans l'optique de restaurer une fonction diminuée chez un patient. Pour l'instant relégués à un marché de niche, les robots d'assistance investissent peu à peu les centres de rééducation fonctionnelle dans lesquels ils sont principalement utilisés pour la prise en charge des maladies et pathologies neuromusculaires [18].

💡 C'est l'exemple parfait de Lokomat[®] et Armeo[®], deux Exos conçus par l'entreprise allemande Hocoma. Ils s'adressent aux pathologies neurologiques, principalement aux patients hémiplegiques à la suite d'un accident vasculaire cérébral⁸, mais également aux patients atteints de sclérose en plaque, de la maladie de Parkinson, ainsi qu'aux traumatisés crâniens, aux blessés médullaires et aux infirmes moteurs cérébraux [19]. Leur objectif commun : réaliser un travail neuromusculaire répété et dirigé vers un but (jeux vidéo rééducatifs et casque de réalité virtuelle) pour stimuler la plasticité cérébrale et ainsi récupérer le schéma moteur du geste, la force et l'amplitude par une assistance robotisée qui s'adapte en temps réel aux capacités de chaque patient. L'écran ou le casque VR constitue pour le patient un biofeedback qui permet d'avoir un rétro-contrôle visuel permanent sur son activité. Cet objectif divertissant lui apportera de la motivation, de la gratification et permettra ainsi d'augmenter sa compliance et l'efficacité de la prise en charge.

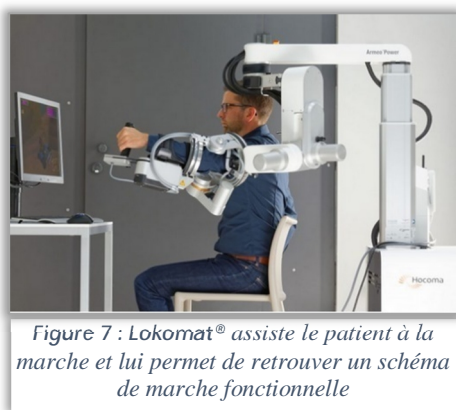


Figure 7 : Lokomat[®] assiste le patient à la marche et lui permet de retrouver un schéma de marche fonctionnelle



Figure 8 : Armeo[®] est un EXO de rééducation neuromotrice du membre supérieur (Source Clinique Saint-Roch de Cambrai)

⁶ Hugh Herr, amputé des deux jambes à la suite d'un accident d'alpinisme, inventeur et utilisateur de sa propre prothèse BIOM

⁷ Massachusetts Institute of Technology

⁸ Des études ont déjà prouvé l'intérêt de ces EXO dans de nombreuses pathologies neurologiques, notamment chez les hémiplegiques où la précocité de la prise en charge est un facteur favorisant une meilleure récupération fonctionnelle [45].

Si des patients hémiparétiques et paraplégiques pouvaient déjà marcher à l'aide d'Exos de déambulation comme Rewalk®, c'est une équipe grenobloise qui a réussi en 2019 l'exploit de faire marcher un patient tétraplégique. Les deux implants cérébraux placés chirurgicalement sur le cortex des hémisphères permettent de commander par la simple pensée l'Exo EMY⁹. Il reste malgré tout, encore des progrès à faire concernant l'équilibre de l'Exo qui est actuellement suspendu à un rail sur le plafond.

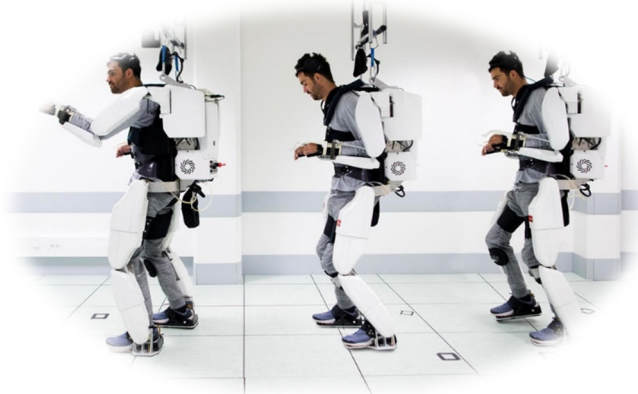


Figure 9 : EMY, le premier Exo d'assistance à la marche d'un patient paraplégique (Source Bordeaux Neurocampus)

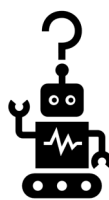
2.2.3 Directions

Si de nombreux modèles d'exosquelettes ont été inspirés par la littérature et les films, on peut dire qu'aujourd'hui c'est la réalité qui dépasse la fiction, et tout laisse présager d'une robotisation de notre société [18].

En ce moment, des équipes pluridisciplinaires comme celle de Hugh Herr au MIT envisagent et expérimentent déjà la possibilité d'effacer la frontière entre l'homme et le robot. Les limites des sciences fondamentales et de la technologie sont mises à mal : des prothèses exosquelettiques directement vissées dans l'os amputé, des capteurs qui recevraient directement les commandes du cortex cérébral ou des nerfs périphériques et les transmettraient à la machine.

De là à devenir tous des cyborgs, le chemin reste encore long à parcourir, et ces technologies émergentes imposent une certaine prudence et questionnent quant à leur efficacité et à leur impact sur l'homme.

Ce sujet soulève également des questions plus éthiques, voire philosophiques : est-ce qu'une robotisation généralisée de notre mode de vie est souhaitable ? Et quelles limites établissons-nous au transhumanisme ?



⁹ Enhancing MobilitY (Augmenter la mobilité)

2.3 L'exosquelette passif du membre supérieur – EPMS

2.3.1 Description

L'exosquelette passif du membre supérieur (EPMS) est un dispositif non-motorisé qui assiste son porteur en compensant le poids de son bras, pour réduire les contraintes subies par l'épaule, par une diminution du travail des muscles de l'épaule au cours d'un travail prolongé ou répétitif avec les bras en élévation. La plupart de ces Exo ont été conçus en collaboration avec de grandes marques de constructeur automobile, dans la perspective d'équiper leur personnel sur les chaînes d'assemblage, et ainsi réduire l'apparition de TMS (les tendinopathies de la coiffe des rotateurs étant ciblées plus particulièrement).

Que ce soit dans le secteur automobile, dans d'autres industries manufacturières (grande distribution, métallurgie, plasturgie, logistique) ou dans le BTP (peintres, électriciens) où ils interviennent également, les EPMS ciblent tous une situation de travail bien précise, décrite dans la littérature sous l'appellation d'« overhead work ».

L'« overhead work » se caractérise par une tâche physique impliquant une flexion d'épaule importante, ce qui peut présenter un fort potentiel traumatique selon la pénibilité du poste de travail et la difficulté de la tâche (poids de la charge portée, travail en force, répétitivité) [20]. Les modalités du travail en usine automobile et les facteurs de risques biomécaniques de l'« overhead work » seront détaillés plus loin.



Figure 10 : EksoVest® (Source EksoWorks)



Figure 10bis : EksoVest

Si certains modèles d'EPMS sont encore des prototypes en phase test, une dizaine de modèles différents sont utilisés in-situ (Cf. Annexe, Figure B). Certains grands noms de la construction automobile, qui avaient besoin d'équiper leur personnel vulnérable sur site, se sont associés avec des concepteurs d'exosquelette à travers des partenariats. Par exemple, Ford a collaboré avec EksoBionics dans le développement du modèle EksoVest® (ci-dessus), pour enfin aboutir à son introduction en masse dès 2017, dans deux usines automobiles américaines, dans lesquelles une diminution de 83 % des TMS sur un an, aurait été mesurée (Source Ford Media Center, 2017). Airframe® de Levitate Tech Inc. est un EPMS qui commence à être utilisé sur les sites de nombreuses entreprises d'activités différentes comme Lufthansa, Nissan, Toyota, John Deere, Alcon et également l'US Air Force.

Du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son poids léger et du fort potentiel qu'il représente, l'EPMS est actuellement l'exosquelette d'augmentation humaine le plus utilisé en contexte professionnel, et également le plus étudié par la communauté scientifique. Si de

nombreuses études confirment leurs intérêts, leur efficacité ne fait pas encore de consensus et les interactions avec l'homme semblent être encore à comprendre. Leur conception varie mais leur fonction et leur action sont exactement similaires : ils assistent l'élévation du bras, que ce soit dans un plan sagittal strict (flexion d'épaule), dans un plan scapulaire, ou bien dans un plan frontal (abduction d'épaule).

2.3.2 Mécanique

Les EPMS se portent comme un sac à dos. La partie distale des bras est attachée par des bracelets qui sont reliés à la structure principale. En postérieur, sur le dos, cette structure rigide va rediriger les forces subies par la région de l'épaule vers le bassin par un système d'accumulation d'énergie comme un ressort ou un vérin (à travers un système de transmission d'énergie et de mouvement comme un câble Bowden par exemple) [21].

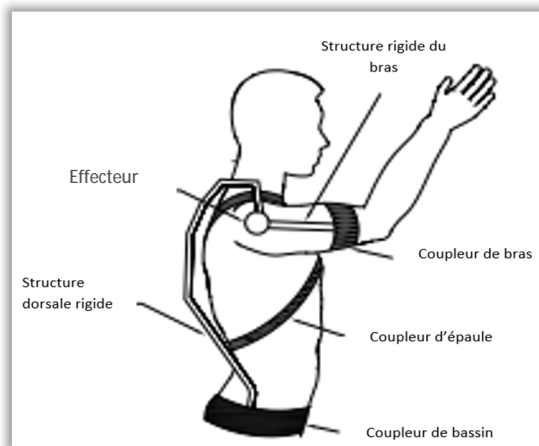


Figure 11 : EPMS - Schéma descriptif

Selon les modèles, il existe différents niveaux d'intensité d'assistance avec un mode de réglage manuel (à l'aide d'un outil), ou bien géré électroniquement (avec interface par bouton). Le niveau d'assistance approprié est normalement calibré avant l'utilisation, en accord avec le poids du membre supérieur (MS) du sujet, le poids de l'outil utilisé (s'il y en a un) et de l'amplitude nécessaire à la réalisation de la tâche [22].

En réalité, ce calibrage correspond à une position d'équilibre à laquelle le poids du MS (et de l'outil éventuel) s'équilibre avec le couple délivré par le système. L'opérateur acquiert ainsi la capacité de maintenir son MS à l'équilibre, sans aucun effort musculaire [23].

L'EPMS apporte un couple moteur qui s'applique au bras comme une force (F en vert), pour contrer le couple résistant généré par le poids du bras et de l'outil (G en bleu). En situation normale, le bras serait soutenu seulement par la force (F_M en rouge) des muscles spécifiquement élévateurs du bras, les muscles fléchisseurs de l'articulation gléno-humérale (faisceau antérieur du deltoïde, coraco-brachial, biceps brachial, faisceau claviculaire du grand pectoral) et d'autres muscles qui agissent comme stabilisateur ou ajusteur dans l'élévation d'épaule (trapèze, dentelé antérieur, petit

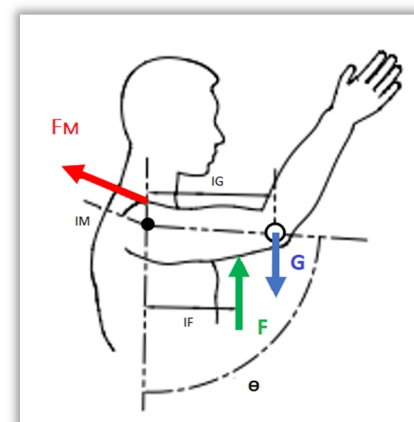


Figure 12 : Schéma des différentes forces qui peuvent s'appliquer sur l'épaule

rond)[24]. (Chaque couple est le produit de la force par le bras de levier correspondant)

L'EPMS est conçu pour délivrer un couple maximum à 90 degrés de flexion de gléno-humérale (Θ), quand le couple généré par le poids de l'épaule (G) est le plus important. Cette assistance décroît à mesure que le bras retourne vers la neutralité, où elle devient nulle. L'énergie produite par le sujet par l'extension active de gléno-humérale à partir d'une position de flexion, est stockée par la structure pour être ensuite restituée pendant l'élévation du bras.

2.4 L'épaule au travail, une zone fragile dans un contexte traumatique

2.4.1 Overhead work, en usine automobile

Ce monogramme de synthèse proposé par l'INRS se réfère à quatre familles de contraintes caractérisées par un excès en force (trop fort), en posture (trop loin), en vitesse (trop vite) et en durée (trop long). Il nous permet de visualiser de manière globale l'astreinte physique d'une situation type d'overhead work dans une chaîne de montage automobile grâce à un tableau de référence des caractéristiques de cette tâche (Cf. Annexe, Figure C) [25].

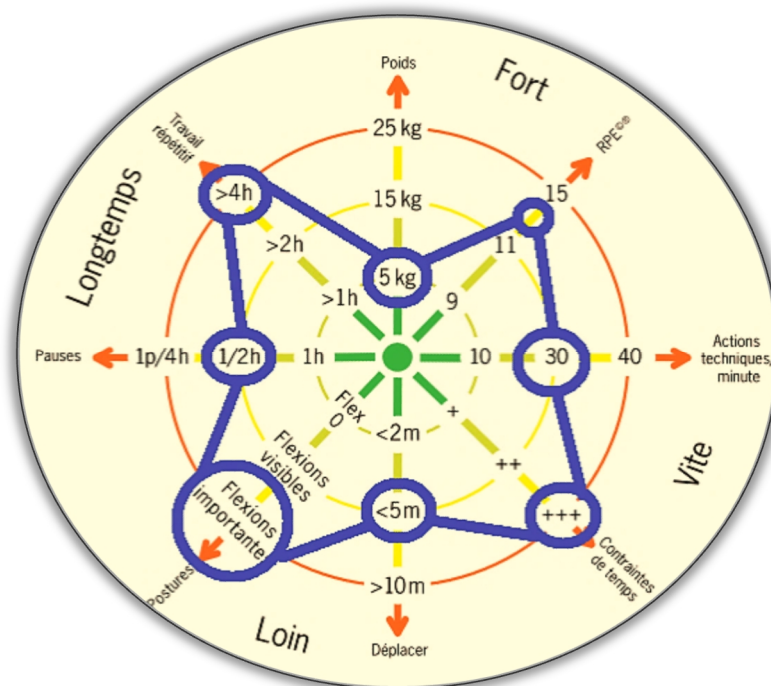


Figure 13 : Le cercle des "trop", appliqué à une tâche d'overhead work en usine automobile (un tableau de tâche de référence a été utilisé ; Annexe - Figure C)

L'environnement de l'usine automobile, combine les facteurs de risques d'hyper-sollicitation de l'épaule. Même si les charges portées sont de poids moyens (poids de l'outil \approx 1-4kg) et que la charge de travail est perçue comme modérément contraignante, les ouvriers travaillent dans des amplitudes de flexion d'épaule importante, sous contrainte de temps (tempo dicté par la machine), avec des mouvements répétitifs pour au moins 4h de cycle de travail. L'usine est un également environnement bruyant. L'ouvrier a très peu de marge de

manœuvre car la tâche à accomplir est bien décrite et le montage suit des exigences et un ordre bien précis.

Les matières premières, principalement le métal nécessaire à la carrosserie sont importées sur site et subissent une série de transformation opérées par une multitude de robots. C'est la partie de l'usine où l'automatisation (robotisation) est la plus présente. Les presses d'emboutissage forment les pièces qui vont ensuite être soudées et rivetées par des robots avant de passer à la peinture. C'est donc une carrosserie de voiture, complètement vide, qui va parcourir, suspendue à un rail les 1 ou 2 km de la chaîne d'assemblage. Les ouvriers y travaillent sous contrainte de temps car la voiture ne s'arrête jamais d'avancer et opérateurs doivent alors se coordonner et minimiser les erreurs pour être productifs. Cette étape qui constitue une production à la chaîne est une véritable fourmilière où les ouvriers vont intégrer à la structure tous les composants de la voiture (garniture, câblage électrique, partie mécanique).

Si certains ouvriers vont opérer à hauteur d'homme en se plaçant à côté de la voiture, une grande partie des ouvriers vont travailler sous le châssis : c'est la tâche d'« overhead work » ciblée par les EPMS. C'est également le scénario rapporté unanimement comme étant le plus contraignant physiquement par des ouvriers spécialisés (Vézina 2003) [26]. Ce poste est particulier car c'est le seul où tous les travailleurs doivent suivre le même ordre dans l'exécution des opérations. Cette absence de marge de manœuvre a des conséquences importantes, jusqu'à restreindre les possibilités de développer un mode opératoire préférentiel et normalise donc les gestes [26].



Figure 14 : Ouvrier en pleine tâche d'overhead work dans une usine Ford en Australie (Source Ford Media Center)

La voiture est placée à une hauteur d'1m90 à 2m10. L'opérateur se tient debout, sous le châssis de la voiture, et va visser, boulonner à l'aide d'outils (perceuse, visseuse, boulonneuse) de manière répétée (≈ 7.5 fois minutes). Le cou est en extension pour permettre de voir l'outil et la zone d'action. Les épaules sont systématiquement placées dans une position de flexion et d'abduction combinée avec une rotation médiale. Les coudes sont plus ou moins fléchis selon la tâche. Le MS prédominant va porter l'outil, le lever et le garder dans

cette position puis recommencer à un autre endroit (travail statique important). L'autre MS va placer la vis ou le boulon et permet également à l'ouvrier de s'accrocher au châssis de la voiture pour se stabiliser ou de maintenir l'outil.

2.4.2 L'épaule, une zone ciblée

Parmi les TMS reconnus en maladies professionnelles par le Régime général de la Sécurité Sociale (RGSS), 90% sont des TMS du MS, dans lesquels l'épaule est impliquée pour 30 % (Source INRS) [12]. Le CNAMTS¹⁰ a observé depuis 2013, une augmentation nette des TMS reconnus comme maladies professionnelles (Cf. *Annexe, Figure D*) imputable en quasi-totalité à l'accroissement des TMS de l'épaule. Encore aujourd'hui, les travailleurs restent durablement exposés aux gestes répétitifs (63 % des actifs), aux efforts musculaires intenses (+ de 30 % des actifs), ainsi qu'aux postures contraignantes (46 %) (Source INRS) [12]. L'épaule est en première ligne aussi bien dans le secteur secondaire, dans les industries manufacturières (agro-alimentaire, grande distribution, plasturgie, métallurgie) et le BTP, que dans le tertiaire avec les aides et soins, à domicile, et en établissements de santé. Dans l'automobile, à eux seuls, les TMS imputables à l'épaule représenteraient plus de 50 % du total de blessures reportées [27].

Si l'apparition de TMS est sensiblement liée aux facteurs qui ont été présentés précédemment, elle est surtout vulnérable aux contraintes biomécaniques de l'environnement professionnel. La tâche d'« overhead work » soumet l'ouvrier automobile à des contraintes à fort potentiel traumatique pour l'épaule : le travail statique prolongé, la répétitivité.

2.4.2.1 Notion de fatigue musculaire

La fatigue est un symptôme à détecter car c'est le premier signe du dépassement des capacités de récupération d'une structure par rapport aux contraintes biomécaniques subies. Elle peut se traduire de manière différente : sensation de lourdeur, inconfort, DOMS, myalgie.

La notion de fatigue prend en considération une quantité d'effort fourni (lié à la difficulté de la tâche et d'autres modalités) pendant un certain temps.

Des chercheurs ont proposé un moyen de quantifier la fatigue musculaire du MS à travers une équation, ce qui permet de définir les normes de limite d'une fatigue acceptable par un sujet.

Pour le MS, le TLV (*Threshold Limit Value*) donne la durée pendant laquelle une personne peut fournir un effort égal à x % de sa MVC (*Maximal Voluntary Contraction*) dans une position donnée [28].

¹⁰ Caisse Nationale d'Assurance Maladie des Travailleurs Salariés

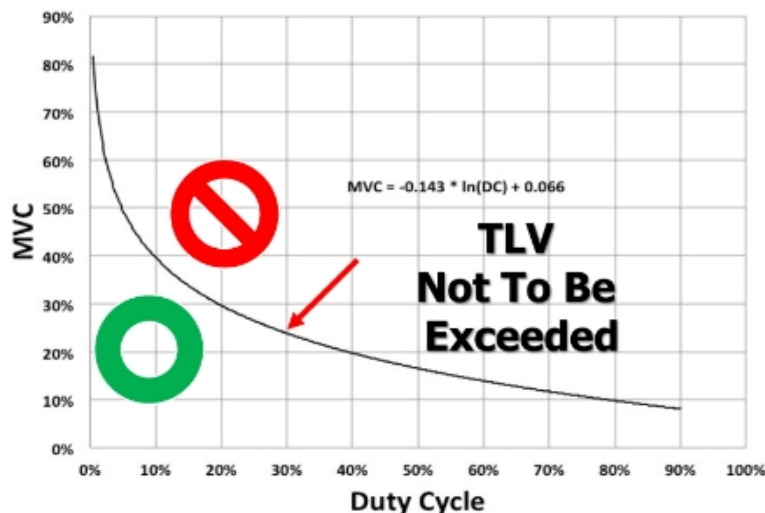


Figure 15 : Courbe représentative d'une valeur seuil acceptable de fatigue musculaire locale (Source Departement of Kinesiology - Iowa State University)

Par exemple, il a été suggéré que 40% de la MVC ne devrait pas être dépassé pour 10% du cycle de travail dans l'optique d'éviter une fatigue potentielle et donc de diminuer le risque de blessures. Si on prend la moitié du cycle de travail (50%), la limite à ne pas dépasser serait 17 % de la MVC et 8 % pour 90% du cycle (Chaffin 1999) [28].

A travers l'équation représentative de cette courbe proposée par l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGH)*, on voit bien que le TLV est bien dépendant de la durée d'exposition, c'est-à-dire à la durée du cycle de travail (*Duty Cycle – DC (%)*) :

$$TLV = -0.143 \times \ln(DC) + 0.066$$

La fatigue musculaire entraîne une perte de potentiel de force et une augmentation du niveau d'effort perçu. Elle peut apparaître à cause d'une contraction trop forte, d'une contraction de basse intensité prolongée (contraction statique) ou bien de contractions répétées (répétitivité) [29].

Il a été décrit à travers des expériences in-vivo que la fatigue musculaire de l'épaule affecte la proprioception. Puisqu'un bon contrôle moteur nécessite une bonne proprioception, Pedersen (1997) a émis l'hypothèse que sa diminution pourrait être un facteur d'augmentation de charge des muscles affectés et d'inefficacité de leur utilisation [29].

La fatigue musculaire entraîne une modification des muscles recrutés pour une même tâche, ce qui affecte donc également les schémas de la mobilité scapulaire et gléno-huméral. Ces changements pourraient favoriser, à travers un schéma cinétique non-adapté, le risque de pathologies, comme notamment le conflit sous-acromial [27].

Des travaux ont montré que certaines fibres musculaires étaient actives continuellement, même pour une sollicitation inférieure à 8 % du MVC, ce qui expliquerait les myalgies locales persistantes du MS. Selon Hägg (1991), le recrutement musculaire se réalise de telle manière, que malgré une activité sous-maximale, certaines fibres musculaires de type I étaient recrutées en premier, et restaient actives jusqu'au repos total du muscle. Ces fibres ont été nommées « fibres de Cendrillon » (« première debout, dernière couchée »). De plus, il a été observé, pendant des gestes répétitifs (avec contraction sous-maximale) comme pour une contraction statique prolongée, que le même groupe de fibres musculaires était recruté de manière élective pour travailler jusqu'à saturation, jusqu'à la fatigue.

2.4.2.2 Travail statique

Pour se contracter, les muscles utilisent l'énergie chimique provenant du glucose acheminé dans le sang. Si cette contraction est prolongée, la compression des vaisseaux entraînera une diminution de l'apport sanguin, et donc une mauvaise perfusion du muscle, qui sera obligé de recourir à des voies métaboliques moins efficaces et productrices de déchets toxiques. Ces substances vont vite s'accumuler et faute d'une élimination efficace, vont être à l'origine d'une inflammation locale.

L'inflammation marque une phase de réponse au stress au cours de laquelle l'inconfort, la fatigue et la myalgie sont fréquents. Une phase de récupération est ensuite nécessaire pour permettre aux tissus d'éliminer les substances irritantes, soit en respectant un repos entre les contractions ou bien en diminuant la durée de la contraction. Les ouvriers d'usine automobile sont exposés tous les jours à ce stress sans pouvoir réduire la durée, l'intensité et la fréquence de l'exposition aux risques. La phase d'utilisation de l'outil (visseuse, boulonneuse) est une phase statique d'environ cinq secondes, pendant laquelle la flexion et l'abduction des épaules est maintenue. Ce contexte accroît le risque de développer et d'entretenir une inflammation chronique des structures et augmente alors le risque de chronicisation des TMS [29].

2.4.2.3 Répétitivité

La répétitivité se définit par le nombre de mouvements par minute d'une articulation, ou par une durée de cycle de travail. Par convention, l'INRS a défini le travail répétitif comme des « *tâches répétées dont la durée est inférieure à 30 secondes ou dans lesquelles la sollicitation des mêmes segments corporels pour des séquences gestuelles identiques occupe plus de la moitié du temps de travail* » (INRS[5]). Cette sollicitation répétée des mêmes segments corporels est un facteur de risque de TMS, par l'insuffisance du temps de récupération des structures sollicitées.

La sixième enquête européenne sur les conditions de travail (Source Eurofound, [30]), a observé une croissance depuis 2000 de l'exposition des travailleurs aux mouvements répétitifs, jusqu'à 61 % en 2015, pour l'ensemble du MS.

Les principales contraintes mécaniques s'exerçant sur le tendon sont dues aux forces de traction du muscle ainsi que les frottements et les compressions avec les structures adjacentes. La répétitivité induite par l'«overhead work » soumet le tendon de la coiffe des rotateurs à des traumatismes répétés qui provoquent des déformations viscoélastiques et des micro-ruptures. Le tableau de la Figure C, en Annexe indique une durée de cycle de 160 secondes pour visser vingt vis, ce qui correspond à une vis toute les 8 secondes.

Ces contraintes excessives répétées vont même entraîner une modification histologique du tendon par un mécanisme réactionnel d'adaptation : les fibres de collagène s'épaississent et les tendons se calcifient. Cette dégénérescence des tissus correspond à une inflammation qui signale le début d'une atteinte tendineuse de la coiffe des rotateurs.

2.5 Modèle d'évaluation des EPMS

Initialement, la problématique de la revue était plutôt dirigée sur l'action thérapeutique des EPMS, s'ils réduisaient efficacement les TMS. L'étape initiale d'une revue est une recherche préliminaire qui permet d'analyser la faisabilité. Cette recherche a validé quantitativement la diversité bibliographique nécessaire à sa rédaction, car les EPMS ont fait l'objet d'un nombre exploitable d'études.

Dans notre cas, répondre à une question thérapeutique consiste à déterminer si un dispositif « traitement » est bien préventif. Or, l'installation des TMS se réalise de manière insidieuse et, souvent, l'apparition des symptômes est sensiblement retardée par rapport à l'exposition initiale à un facteur de risque. Pour se faire une idée objective de l'efficacité, cela nécessite donc de faire une observation des EPMS sur une durée assez longue (plusieurs semaines ou mois, au minimum). Des études longitudinales qui observent l'apparition de TMS sur le long cours étaient alors particulièrement attendues. Mais en réalité, force est de constater qu'il n'existe aucune étude qui observe les EPMS sur la durée ¹¹ et aucune n'utilise comme critère de jugement l'apparition de TMS ou de ses symptômes cliniques.

Au vu de la qualité de la littérature, et faute de contenu à comparer, il nous était impossible de répondre concrètement à la problématique de base. C'est pour cette raison qu'elle a été modifiée.

A ce stade, en observant plus attentivement le contenu et les variables présentes, l'étude préliminaire a donc permis de recadrer la problématique pour mieux l'adapter à la littérature :

Est-ce-que l'EPMS diminue véritablement la fatigue musculaire et la pénibilité ?

La vérification de l'efficacité de ces dispositifs passe par deux axes :

- D'une part, *confirmer qu'il apporte bien une assistance*. Ce qui revient indirectement à observer l'activité des muscles aidés pour vérifier qu'ils travaillent moins.
- D'autre part, *qu'il n'y ait pas une augmentation globale des contraintes ou un déplacement de contraintes* ; c'est-à-dire que l'assistance ne se fait pas au détriment d'un effort supplémentaire d'un autre segment corporel, ou alors qu'elle n'augmente pas en réalité la charge physique chez le sujet.

Certains auteurs, comme *Heffeler* [21], proposent une approche holistique dans l'optique de standardiser l'évaluation de l'efficacité des EPMS et suggèrent une observation complète associant :

¹¹ Peut-être par faute de moyen, et des difficultés pratiques que présente une étude de longue durée en contexte professionnel.

Une mesure subjective de la pénibilité d'une tâche (fatigue perçue) :

- *L'échelle Borg*, qui comprend le *CR 10* et le *RPE* (Rating of Perceived Discomfort).

Une mesure objective locale de fatigue musculaire :

- *L'électromyographie de surface* (EMG), qui donne une indication sur l'activation musculaire, est un bon indicateur pour évaluer la fatigue et le stress musculaire entre une situation d'intervention (Exo) et une situation de contrôle.

Une mesure objective globale indirecte de l'effort :

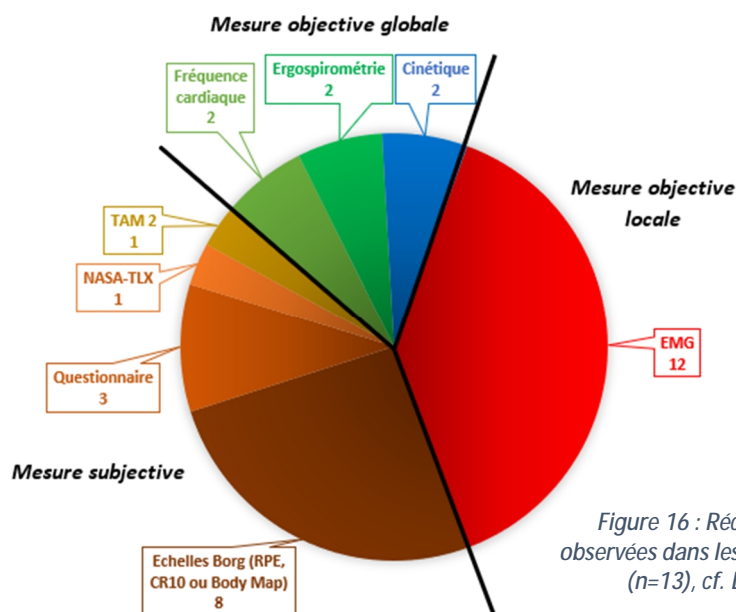
- *La fréquence cardiaque* indique l'effort métabolique général.
- *L'ergospirométrie* donne des indications sur les gaz respiratoires (O_2 , CO_2) pendant l'effort grâce à un masque.

Une analyse cinétique de la répercussion de l'utilisation des EPMS par simple analyse vidéo ou plus objectivement par un logiciel d'analyse cinétique, des caméras et des capteurs corporels.

Si cette méthode constitue un idéal théorique pour rassembler le plus de données biomécaniques, concrètement, on constate que peu d'études prennent en compte de manière globale l'évaluation des EPMS comme *Heffeler* l'a suggéré. La quasi-totalité des études utilise une méthode plus accessible en se focalisant sur un nombre plus réduit de variables.

Fort de ce constat, il nous paraissait important de choisir, parmi tous les différents types de variables étudiées dans la littérature, celles qui étaient les plus pertinentes pour répondre à la problématique. Il fallait d'autre part s'assurer que ces variables étaient présentes en quantité suffisante.

Une observation prospective s'imposait pour permettre de se faire une idée des différents types de variables présentes dans toutes les études liées aux EPMS (lues en entière, $n=20$, Cf. Diagramme de flux).



L'EMG et les échelles de Borg sont les plus représentées à travers la littérature pour étudier les EPMS et semblent également correspondre parfaitement à la problématique. Le premier étant un marqueur objectif de l'activité et de la fatigue musculaire locale et le second une mesure subjective d'une fatigue perçue.

Figure 16 : Réurrence des variables observées dans les références sélectionnées ($n=13$), cf. Diagramme de flux

- Ø L'EMG est intéressant car c'est un indicateur de l'effort musculaire local. Ce sera donc un marqueur indirect pour évaluer l'assistance de l'EPMS en observant l'augmentation ou la diminution d'activité des muscles cibles. Il permet également de déterminer un niveau de charge de travail et de pénibilité d'une tâche : plus une tâche est physiquement exigeante, plus les muscles travailleront [31].

La dépolarisation de la fibre musculaire causée par des mouvements ioniques s'opérant au travers du sarcolemme, crée un champ électrique autour de la fibre musculaire. Ce potentiel d'action va être détecté par des électrodes de surface pour obtenir un signal qui subira ensuite un traitement pour être exploitable : généralement amplification, filtrage pour enfin obtenir une valeur en pourcentage qui représente un taux d'activité musculaire maximale. Le 100% correspond à une contraction isométrique maximale demandée préalablement au sujet (notion de *Maximal Voluntary Contraction – MVC*).

- Ø Les échelles de Borg permettent une évaluation subjective précise non instrumentalisée d'une charge physique de travail, ou pénibilité. Elles sont de validité élevée et se complémentarisent parfaitement avec évaluation objective [31][32][33].

Le *RPE (Rating of Perceived Exertion)* est plutôt utilisé pour évaluer l'astreinte globale du corps face à l'effort (Cf. Annexe, Figure E). Le minimum, 6, correspond à un repos total et 20 correspond à un effort maximal. Le score RPE est par ailleurs relié à la fréquence cardiaque (FC) par une équation qui a été validée par de nombreux auteurs [31] : $FC = 10 \times RPE$.

Le *CR10 (Categorical Rating 10)* est plutôt utilisé pour des astreintes locales (Cf. Annexe, Figure E). Le CR10 a également sa propre équation unanimement validée : $Force = CR10 \times 10$. Dans cette relation, la force est exprimée en pourcentage de la force maximale volontaire (MVC). Il existe plusieurs variantes du CR10 comme le Body Map, où chaque zone du corps possède son propre score sur 10 pour évaluer l'inconfort (ou la contrainte) perçu dans différentes zones anatomiques.

Les liens directs établis à travers ces équations, entre échelle subjective et mesure objective quantifiable de l'effort physique, prouvent la haute validité et l'intérêt de l'utilisation des échelles de Borg.

2.6 Objectif de la revue de littérature

Il existe un véritable intérêt kinésithérapique dans l'évaluation critique des dispositifs ergonomiques présents sur le marché, qui, à défaut d'apporter les bienfaits qu'ils promettent, suivent parfois une logique purement mercantile. A travers des connaissances médicales et une démarche scientifique, les professionnels de santé et notamment le kinésithérapeute, ont un rôle clé dans la validation de ces appareils ergonomiques et préventifs que sont les robots et les dispositifs d'assistance physique. Ces derniers doivent être considérés et étudiés au même titre que des aides techniques, et avec le même degré de précision, car ils impliquent tous de nombreuses interactions biomécaniques et psycho-sociales, parfois insoupçonnées, avec l'homme.

Les EPMS sont des nouvelles technologies émergentes prometteuses qui répondent à un besoin concret des travailleurs industriels pour lutter contre les TMS. Malgré tout, face à l'absence de consensus sur leur validité et sur les conséquences d'une utilisation prolongée, il faut se montrer prudent et réservé quant à une confirmation immédiate de leur efficacité. La démarche de validation scientifique de l'utilité d'un outil est indispensable à son adoption et à sa généralisation à un public plus large, et s'inscrit tout à fait dans le travail de questionnement de l'état des connaissances que représente la revue de littérature.

L'objectif de cette revue est de se faire une idée objective de l'efficacité des exosquelettes passifs du membre supérieur en évaluant leur impact sur la fatigue et la pénibilité. L'idée est donc, d'une part de vérifier si les muscles assistés sont bien délestés d'une charge de travail, et d'autre part, de s'assurer que l'assistance fournie ne se fait pas au détriment d'une autre zone corporelle (effets indésirables).

Cette problématique rentre dans le cadre d'une question thérapeutique bien que l'on ne puisse pas considérer les EPMS comme un traitement en tant que tel mais plus un outil ergonomique préventif.

2.6.1 Modèle PICO

Le modèle PICO a été établi en lien avec la question d'étude :

P	Population	Utilisateur d'EPMS
I	Intervention	L'utilisation d'un EPMS
C	Comparateur	Absence de comparateur, sans exosquelette
O	Outcome / Critère de jugement	Mesures d'Electromyogramme et les échelles de Borg

3. Méthode

Dès lors que le contexte du sujet a été posé et que la problématique a bien été précisée, cette partie s'appliquera à présenter la méthodologie adoptée pour la rédaction de cette revue.

3.1 Critères d'éligibilité des études

3.1.1 Types d'études retenues

La question clinique étant de type thérapeutique, les types de protocoles retenus seront les suivants :

- *Série de cas*
- *Essai clinique randomisé*
- *Essai clinique quasi-randomisé*
- *Essai clinique non-randomisé*
- *Etude Expérimentale en Cas Unique (EECU)*

3.1.2 Population

L'idéal est de cibler des travailleurs expérimentés et spécialisés dans le travail industriel pour coller au plus avec l'action cible des EPMS. Même si la population d'ouvriers d'usine automobile est une population masculine pour sa quasi-totalité, avec un âge moyen de 42,8 ans (Source Vézina 2003 [26]), les critères d'éligibilité seront ici volontairement peu exclusifs, pour avoir le plus de résultats possibles. Sont donc également acceptés, les sujets totalement étrangers au milieu industriel et automobile, ainsi que les sujets ayant ou n'ayant pas de comorbidités ou d'antécédents médicaux. En résumé, on peut considérer que toute personne en âge de travailler et en mesure d'assumer physiquement le poste de travail peut rentrer dans la population éligible.

3.1.3 Intervention

L'intervention correspond à l'utilisation d'un EPMS, d'un modèle déposé (hors prototypes), au cours de la réalisation d'une tâche active d'« overhead work ». Les études qui observent l'utilisation de l'EPMS dans un cadre concret, en environnement réel, seront prioritaires. Mais, toutes les tâches réalisées dans le cadre d'une simulation de tâches réelles en environnement d'étude ainsi que des tâches expérimentales seront tolérées.

3.1.4 Comparateur

L'intervention de comparaison recherchée est l'absence d'intervention donc une absence d'utilisation d'EPMS.

3.1.5 Critères de jugement

Comme expliqué précédemment (*cf. Modèle d'évaluation des EPMS*), deux critères de jugements ont été retenus :

- D'une part, l'électromyogramme (EMG) des muscles de l'épaule pour quantifier le travail musculaire fourni, mais aussi celui des muscles périphériques, à distance de l'épaule, pour étudier l'éventuel déplacement de contrainte vers un autre segment corporel.
- D'autre part, le score des échelles de Borg, que ce soit le CR-10, le RPE ou leurs dérivés.

3.2 Méthodologie de recherche

3.2.1 Mots-clés

A partir de la problématique qui a été posée, « Est-ce-que les EPMS réduisent la fatigue musculaire et la pénibilité du travail ? », une liste de mots-clés a été établie grâce à MeSH Inserm¹², un thésaurus bilingue de référence du domaine biomédical. Il est important de préciser que le nombre de mots-clés relatifs à l'EPMS a été nettement élargi pour trouver le plus de résultats possibles car il n'existe pas d'appellation commune au terme « exosquelette », mais une multitude de synonymes.

	<i>Mots-clés en français</i>	<i>Mots-clés en Anglais</i>
<i>Population</i>	Travailleur Travail Industrie Industrie automobile	Workers Occupational Work Industry Automotive industry
<i>Intervention - EPMS</i>	Exosquelette Exosquelette passif Exosquelette industriel Exosquelette du membre supérieur Exosquelette d'épaule Dispositif d'assistance porté Support passif du bras	Exoskeleton Passive exoskeleton Industrial exoskeleton Upper extremity exoskeleton Shoulder exoskeleton Wearable assistive device Passive arm support
<i>Critères de jugement</i>	Efficacité // Evaluation Effet Electromyogramme EMG Echelle Borg CR-10 RPE Mesure de perception de l'effort	Effectiveness efficiency Evaluation Effect Electromyogram // Borg scale // // Rating of Perceived Exertion

¹² Medical Subject Headings – Institut National de la Santé Et de le Recherche Médicale

3.2.2 Équation de recherche

En intégrant ces mots clés dans une équation avec des opérateurs booléens l'équation suivante est obtenue :

En français : (*travailleur* OU *travail* OU *industrie* OU *industrie automobile*) ET (*exosquelette* OU *exosquelette passif* OU *exosquelette industriel* OU *exosquelette du membre supérieur* OU *exosquelette d'épaule* OU *dispositif d'assistance porté* OU *support passif du bras*) ET (efficacité OU évaluation OU effet OU électromyographie OU EMG OU échelle Borg OU CR10 OU RPE OU mesure de perception de l'effort)

En anglais : (*workers* OR *work* OR *occupationnal* OR *industry* OR *automotive industry*) AND (*exoskeleton* OR *passive exoskeleton* OR *industrial exoskeleton* OR *upper extremity exoskeleton* OR *shoulder exoskeleton* OR *wearable assistive device* OR *passive arm support*) AND (*effectiveness* OR *efficiency* OR *effect* OR *electromyogram* OR *EMG* OR *Borg scale* OR *CR10* OR *RPE* OR *rating of perceived exertion*)

3.2.3 Sources documentaires investiguées

A partir d'octobre 2019, plusieurs sources documentaires ont été investiguées à l'aide de notre équation de recherche finale (et certaines avec peu de succès) :

- PubMed : 151 résultats
- Pedro, Cochrane et Kinedoc : 0 résultats
- Google Scholar : 567 résultats

Au vu de l'actualité que constituent les EPMS et, par conséquence de la nouveauté de la littérature les concernant¹³, de nouvelles parutions étaient attendues au cours de la rédaction de la revue. Le travail de veille bibliographique s'est donc poursuivi jusqu'en mars 2020, de manière concourante à l'écriture de la revue de littérature, pour s'assurer d'inclure toute œuvre parue début 2020¹⁴.

Finalement, cette recherche a obtenu 718 résultats issus aussi bien de bases de données scientifiques que de la littérature grise. Pour un aspect purement pratique, un logiciel de gestion bibliographique, Mendeley, a été utilisé pour l'exploitation des références.

¹³ Sur les articles concernant les EPMS intégrés à la Bibliographie (n=24), 67% ont été publiés après 2018 et 14% en 2020.

¹⁴ Ce qui fut le cas pour 2 des 13 références sélectionnées

3.3 Extraction et analyse des données

3.3.1 Critères d'inclusion

Plusieurs tris ont été réalisés à partir des 718 œuvres obtenues après investigation des sources citées précédemment. Un premier tri a été effectué à travers une simple lecture des titres des ouvrages pour éliminer rapidement les hors-sujets. C'est un tri qui s'est voulu conservateur, quitte à reléguer des articles conservés à une élimination ultérieure.

Puis, un second tri a été effectué par la lecture des abstracts. Ce tri a permis d'éliminer les articles retenus précédemment par précaution et de cibler le plus possible le sujet.

Enfin, l'étape de tri sur texte entier a eu pour objectif de ne garder que les articles pertinents, en détectant tous les contresens et les erreurs de sélection.

Voici les critères d'inclusion que doivent respecter les études pour rentrer dans la revue :

La synthèse qualitative :

- répondre aux critères d'éligibilité des études,
- examiner au moins un des deux critères de jugement
- études de type défini (Série de cas, Essai Clinique Randomisé (ECR), EC quasi-R, EC non-R, étude expérimentale en Cas Unique (EECU))

La synthèse quantitative (méta-analyse) :

- études jugées d'une fiabilité méthodologique acceptable

3.3.2 Critères d'exclusion

Les études rédigées dans une langue autre que le français et l'anglais seront exclues.

Tout ouvrage présentant des conflits d'intérêt avec un constructeur d'exosquelette ou une autre corporation, seront exclus immédiatement.

3.3.3 Extraction des données

L'étape d'extraction des données consiste à collecter et retranscrire les caractéristiques obtenues ainsi que les résultats des études incluses dans la revue. L'objectif est de présenter les données de manière synthétique et tout à fait objective de façon à donner un portrait précis des études. Le format du tableau correspond tout à fait à ces exigences et synthétisera bien le contenu.

Les résultats présentés dans ces tableaux seront développés dans la partie *Résultats*, dans laquelle ils seront comparés statistiquement, puis présentés sous une forme graphique (tableau, graphique forêt), si l'hétérogénéité des études le permet.

L'interprétation des résultats fera l'objet de plus amples analyses et interprétations dans la partie *Discussion*.

3.3.4 Évaluation de la qualité méthodologique des études sélectionnées

Cette étape d'évaluation critique de la qualité des études permet de cibler les risques de biais suffisamment importants pour compromettre l'interprétation et les résultats. Le recueil d'informations et l'utilisation d'une grille de lecture choisie permettront de juger du degré de confiance accordée à la validité de chaque étude et de déterminer différents niveaux de qualité : qualité élevée, intermédiaire et faible.

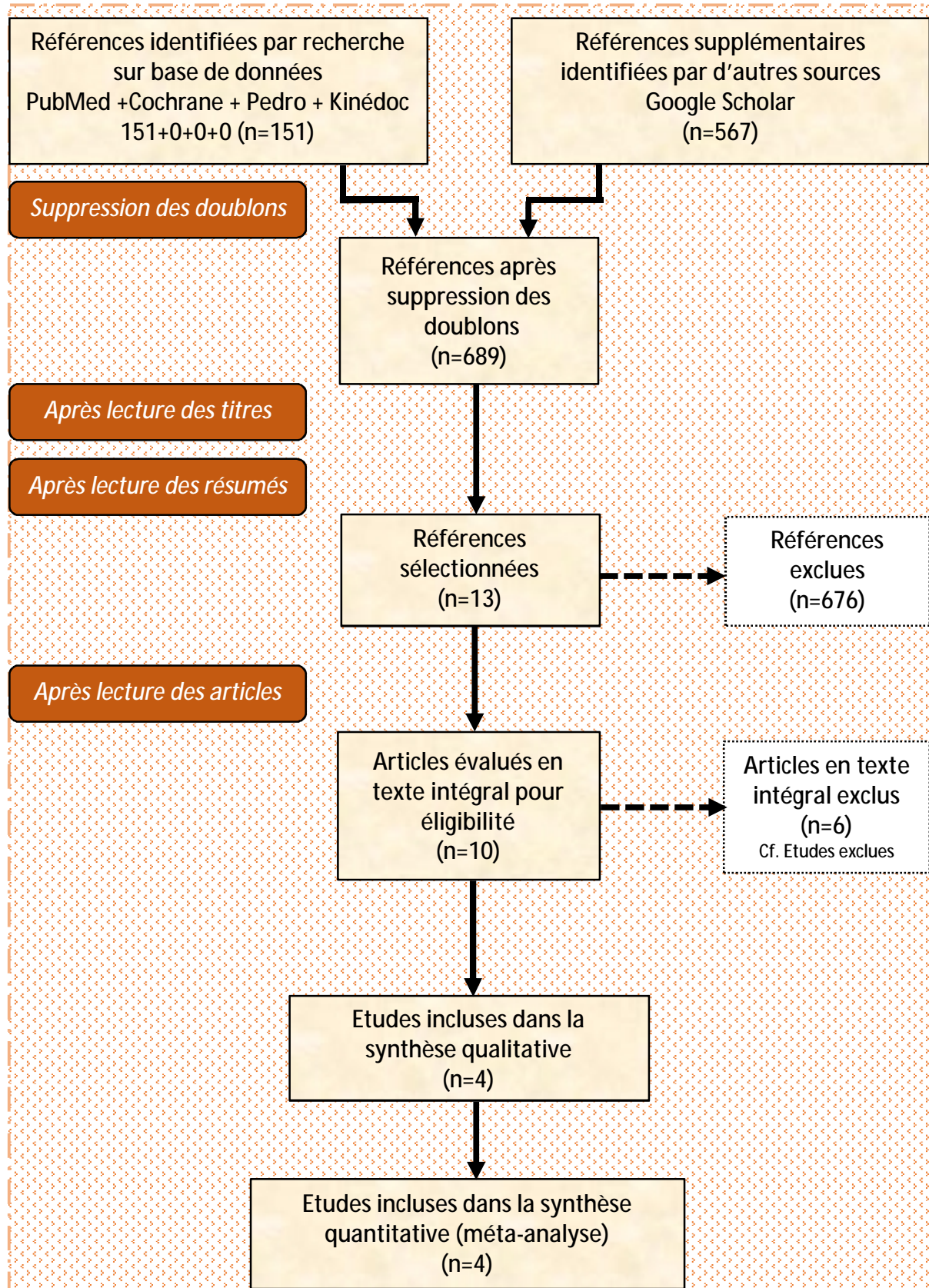
Les grilles de lecture sont des échelles spécifiques à certains types d'études. Le type d'étude retenu a fait l'objet d'un critère de sélection (*Cf. 3.1 Critères d'éligibilité des études*) :

- Pour les essais cliniques (ECR, EC quasi-R, EC non-R), la grille *PEDro* sera utilisée
- Pour les séries de cas, ce sera l'échelle *JBI Critical Appraisal Checklist for Case Serie*
- Pour les études expérimentales en cas unique, le *Risk of Bias in N-of-1 Trials (RoBiNT) Scale*

4. Résultats

4.1 Caractéristiques des études

4.1.1 Diagramme de flux



Le diagramme de flux schématise l'entonnoir méthodologique qui a abouti à la sélection des 4 études suivantes qui ont finalement été intégrées la synthèse quantitative avec un score minimum de 20/30 à l'échelle RoBiNT :

1) Alabdulkarim S, Nussbaum MA.

Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. *Applied Ergonomics 2018 ; 74 : 55-66.* [34]

2) Gillette JC, Stephenson ML.

Electromyographic assessment of a shoulder support exoskeleton during on-site job tasks. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors 2019 : 1-9.* [35]

3) Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MI, Alemi MM, Jia B, Rashedi E.

Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I –“Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics 2018 ; 70 : 315-322.* [36]

4) Van Engelhoven L, Poon N, Kazerooni H, Rempel D, Barr A, Harris-Adamson C.

Experimental Evaluation of a Shoulder-Support Exoskeleton for Overhead Work: Influences of Peak Torque Amplitude, Task, and Tool Mass. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors 2019 : 1-14.* [37]

4.1.2 Études exclues

Six études en lecture entière ont été exclues car elles ne répondaient pas aux critères d'éligibilité ou ne pouvait pas être intégrées au vu de leur contenu.

<i>Etude</i>	<i>Motif d'exclusion</i>
Huysamen 2018 [38]	Modèle d'Exo. trop différent par rapport aux autres EPMS
Heffeler 2020 [21]	Absence de résultats, inéligible pour la méta-analyse
Kim 2018 (Part II) [39]	Absence des critères de jugement choisis
Kim 2019 [40]	Peu pertinente car presque en tout point similaire avec Kim 2018
Luque 2019 [41]	Etude cinétique seulement, absence des critères de jugement
Schmalz 2019[42]	Conflit d'intérêt avec Ottobock (constructeur du PAEXO)

4.2 Préambule

Avant toute présentation et analyse ultérieure des résultats obtenus, il est important de préciser ici une notion cruciale qui apparaît à travers la lecture de ces quatre études expérimentales. Ces dernières ont toutes en commun une démarche scientifique similaire. En effet, pour un même sujet étudié, il peut exister différentes finalités et différentes approches dans la réalisation d'une étude.

Les études « pragmatiques » s'appliquent à donner des résultats quantitativement significatifs qui seront utiles de manière immédiate dans le contexte de la pratique. L'objectif est de déterminer la performance d'une intervention en situation réelle par un choix précis dans les caractéristiques des études (population cible, critères de jugement pertinents). Il y a une exigence de pertinence des résultats obtenus qui se veulent directement extrapolables et applicables dans l'environnement où l'étude est menée.

L'autre approche est une approche « explicative ». L'objectif est ici un accroissement des connaissances. Les critères de jugements, la population et les méthodes de comparaison sont choisis pour améliorer la compréhension globale de l'efficacité d'une intervention encore mal comprise ou peu étudiée, comme c'est le cas pour les EPMS. Si ces choix peuvent constituer un moyen d'améliorer la validité interne et la signification des résultats obtenus, ils diminuent potentiellement la validité externe et la pertinence clinique des résultats.

A travers l'analyse de l'état des connaissances sur les EPMS et à la suite de la lecture des quatre EECU incluses dans la revue, il paraît évident qu'elles s'inscrivent tout à fait dans une démarche « explicative ».

Cela implique d'une part, qu'il faut s'attendre à des résultats quantitativement peu significatifs vis-à-vis de la pratique clinique, ou dans notre cas, peu applicables à un environnement de travail réel ; et d'autre part, qu'il faut analyser ces résultats avec beaucoup de prudence, en s'attachant à pondérer l'analyse avec les spécificités propres à chaque étude.

J'étais bien conscient que le sujet original choisi présenterait des points d'ombre et des lacunes qui imposeraient des adaptations par rapport à une revue de littérature traditionnelle. Cependant, le véritable besoin d'évaluation ergonomique de ces Exos, et l'intérêt personnel qu'il ont pu susciter chez moi, m'ont convaincu de la légitimité de la problématique choisie. Tout au long de cette revue, et malgré la difficulté que représente l'étude d'un sujet nouveau, vierge de toutes analyses et conclusions, je me suis engagé à respecter scrupuleusement la méthodologie, pour faire rentrer mon sujet dans un cadre strict. Malgré tout, il est important de préciser que la comparaison statistique des résultats prévue à l'origine, n'a pas pu être réalisée, faute de données exploitables.

Les résultats qui sont présentés ci-après sont une compilation des informations tirées des articles eux même, ainsi que des compléments de données qui m'ont été partagées directement par les auteurs des différentes études, avec lesquels j'ai pu entrer en contact. Le tout forme donc un ensemble très hétérogène. Ces résultats ont déjà subi différents traitements statistiques complexes, et les données brutes exploitables qui étaient attendues n'apparaissent pas ou ne sont pas accessibles, rendant toute analyse statistique impraticable.

Ce manque de comparabilité traduit par ailleurs l'approche « explicative » de ces études, qui cherchent à faire avancer l'état des connaissances, sans véritable méthode de référence, et avec des moyens apparemment réduits.

Si la comparaison statistique des résultats est impossible, cela n'implique pas pour autant que leur validité scientifique et leur signification statistique ne sont pas satisfaisantes. Hors analyse statistique, ces résultats seront tout de même examinés avec la même rigueur et feront l'objet de plus ample discussion.

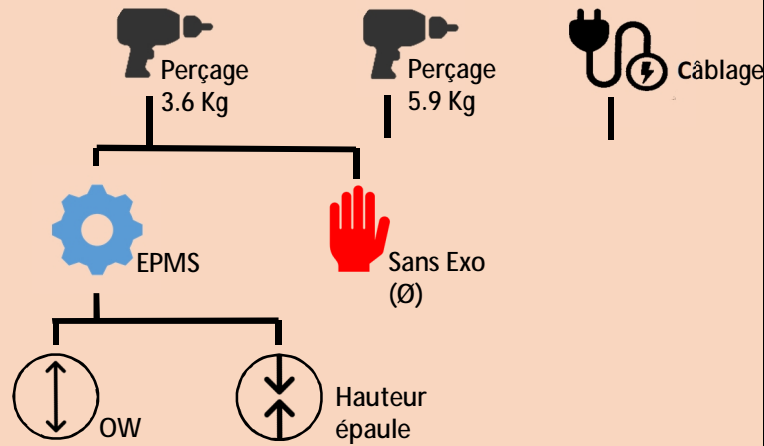
4.3 Études incluses¹⁵

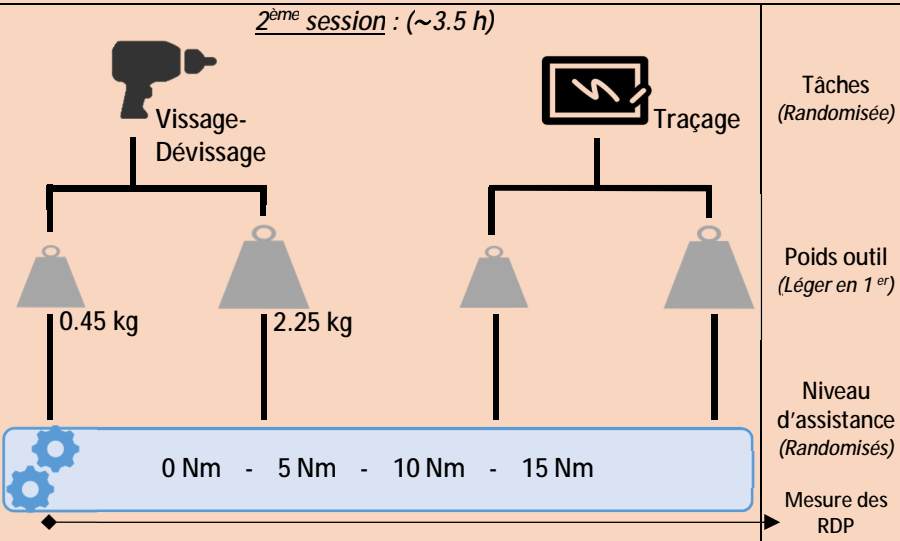
Ci-après, les tableaux de synthèse des quatre études incluses.

¹⁵ La notation « s » évoque un résultat significatif et « ns » non-significatif.

Étude et type	Population		Intervention(s)		Tâche(s)		
	Sujets	Âge, Taille et Poids	Exos	Contrôle	Description	Poids de l'outil	Hauteur(s) de tâche
Alabdulkarim 2018 [34] EECU en traitement alternant	8♂ 8♀ Sains, Inexpérimentés Droitiers	23 ± 2 ans 1.72 ± 0.04 m 72 ± 12 kg	<ul style="list-style-type: none"> EPMS - ShoulderX® (SuitX) 2 autres Exos (non EPMS) 	<ul style="list-style-type: none"> Sans Exo (∅) 	Expérimentale : ∅ Tâche simulée de perçage répétitif : - Insertion de la sonde dans 6 trous successifs - Application d'une force requise minimum (F ≥ 66.7 N) avec feedback auditif pendant 2.5 s	<ul style="list-style-type: none"> 2 Kg 5 Kg 	Ajustée à chaque sujet pour que la pointe de l'outil touche la zone d'action (90° flexion épaule, 90° flexion coude)
Design					Résultats / Contrôle Vs EPMS		
8 conditions, effectuées par chaque sujet					EMG		Borg - RPD
Entraînement initial : Aux tâches avec et sans EPMS Choix du niveau d'assistance par préférence du sujet					Bilatéral (Droit et Gauche) : Deltoïde antérieur Triceps brachial Deltoïde moyen Iliocostal – partie lombaire		Main/poignet, bras, épaule, cou, lombaire, cuisse, jambe/pied (<i>le côté le plus inconfortable est retenu</i>)
1^{ère} session : (~3.5 h)			2^{ème} session : (~3.5 h)		<i>En isolant les résultats obtenus pour l'EPMS, (Droit noté « D » et gauche « G »)</i>		
					Poids outil <i>(Léger en 1^{er})</i>	EMG amplitude (pic, 90^{ème} percentile) ± 18% ▼ Deltoïde antérieur (D) ± 26% ▼ Deltoïde antérieur (G) ± 26% ▼ Deltoïde moyen (D) ± 28% ▼ Deltoïde moyen (G) ± 15% ▼ Iliocostal (D) ± 18% ▲ Triceps (D), ♀ uniquement	
					Intervention <i>(4x4 Latin square)</i>	Effet ▲ s. du poids sur tous les muscles	
					Mesure des RDP	EMG amplitude (médian, 50^{ème} percentile) ± 25% ▲ Triceps (D), chez ♀ uniquement ▲ ns. de l'Iliocostal chez ♀	

Étude et type	Population		Intervention(s)		Tâche(s)		
	Sujets	Âge, Taille et Poids	Exos	Contrôle	Description	Poids de l'outil	Hauteur(s) de tache
Gillette 2019 [35] <i>EECU introduction/retrait</i>	4 ♂ 2 ♀ Expérimentés (volontaires de chez John Deere - engins agricoles)	41 ± 7 ans 1.71 ± 0.08 m 76 ± 11 kg	• EPMS - Airframe® (Levitare)	• Sans Exo (Ø)	<i>Travail réel sur site (chaque sujet à son poste) : (Tâche n°)</i> 1) Assemblage d'ailes 2) Soudure 3) Assemblage automobile 4) Assemblage hydraulique 5) Suspension de pièces 6) Peinture		Variable d'une condition d'Overhead stricte à une tâche à hauteur d'homme
			Niveau d'assistance				
Design					Résultats / Contrôle vs EPMS		
<i>Entraînement initial :</i> Plusieurs journées de travail avec l'EPMS					EMG		
<i>Jour 1 :</i> Cycles consécutifs avec et sans EPMS		<i>Jour 2 :</i> Cycles au début/fin de journée, sans EPMS (Ø)		<i>Jour 3 :</i> Cycles au début/fin de journée, avec EPMS		Enregistrements	
						Unilatéral (côté du bras dominant) : Deltoïde antérieur Biceps brachial Trapèze supérieur	
						Bilatéral : Paravertébraux	
Tout muscle >5%MVC pendant 1 seconde est considéré comme actif, donc le temps d'activité a été incrémenté dans l'équation de limite de fatigue localisée du MS (TLV – Threshold Limit Value, p.15-Notion de fatigue musculaire) puis comparé à la courbe seuil.							
					EMG		TLV
De manière globale :					▼ ns. de tous les muscles		Deltoïde ant. <TLV
Cycles consécutifs :					▼ s. pour le Deltoïde ant. (p=0.02)		Deltoïde ant. ▼ <TLV
Fin de journée :					▼ s. pour le Biceps (p=0.02)		Deltoïde ant. et Trapèze sup. ▼ <TLV
A travers les différentes tâches : (Cf. Annexe, Figure G)					Pour soudure, assemblage automobile et hydraulique, suspension et peinture : ▼ du Deltoïde ant.		Pour assemblage automobile et hydraulique Deltoïde ant. ▼ <TLV. Pour soudure, suspension et peinture, le Deltoïde ant. était déjà <TLV
					Pour l'assemblage d'aile ▲ du Deltoïde ant.		Deltoïde ant. ▲ > TLV

Étude et type	Population		Intervention(s)		Tâche(s)			
	Sujets	Âge, Taille et Poids	Exos	Contrôle	Description	Poids de l'outil	Hauteur(s) de tâche	
Kim 2018 (Part I) [36] <i>EECU en ligne de base multiple</i>	6♂ 6♀ Sains, Inexpérimentés	27 ± 7 ans 1.71 ± 0.05 m 68 ± 8 kg	<ul style="list-style-type: none"> EPMS - EksoVest® (EksoBionics) 	<ul style="list-style-type: none"> Sans Exo (Ø) 	<u>Expérimentales :</u> Ø Tâche simulée de perçage répétitif : - Insertion de la sonde dans 6 trous successifs - Application d'une force requise minimum ($F \geq 111.2$ N) avec feedback auditif pendant 2.5 s Ø Tâche simulée de câblage : - Appairer 10 câbles colorés entre eux	<ul style="list-style-type: none"> 3.6 Kg -Léger 5.9 Kg -Lourd 	<ul style="list-style-type: none"> A hauteur d'épaule Overhead work (OW) calculée à partir de mesures anthropométriques, Flexion d'épaule >90° 	
Design					Résultats / Contrôle vs EPMS			
12 conditions, répétées 2 fois par chaque sujet					EMG		Borg	
1 ^{ère} session : (40 min) Entraînement aux tâches avec et sans EPMS, dans les deux hauteurs					Bilatéral : Deltoïde antérieur Triceps brachial	Deltoïde moyen Trapèze supérieur	Cou, épaule, bras, avant-bras, dos (thoracique), dos (lombaire), membre inférieur.	
2 ^{ème} session : (~2.5 h) <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">  </div>					Tâches et Poids outil (3x3 Latin square)	Intervention	Hauteur	Mesure des RDP
					<u>Pour toutes les tâches et hauteur :</u> <u>EMG amplitude (pic, 95^{ème} percentile)</u> ± 30% ▼ moyenne de l'ensemble des muscles ± 28% ▼ Deltoïde antérieur (D) ± 38% ▼ Deltoïde moyen (D) ± 24% ▼ Deltoïde moyen (G) ± 32% ▼ Trapèze supérieur (D) ± 44% ▼ Triceps (D) <u>EMG amplitude (médian, 50^{ème} percentile)</u> ± 33% ▼ moyenne de l'ensemble des muscles ± 24% ▼ Deltoïde antérieur (G) ± 48% ▼ Deltoïde moyen (D) ± 49% ▼ Deltoïde moyen (G) ± 35% ▼ Trapèze supérieur (D)	<u>Pour toutes les tâches</u> ±35% ▼ avant-bras (Perçage lourd) ±31% ▼ avant-bras (Perçage léger)	Peu de résultats significatifs,	
					<u>Hauteur :</u> L'augmentation de la hauteur a eu un effet significatif sur tous les muscles sauf le Trapèze supérieur (G) ±33% ▼ à hauteur OW (pic, tous muscles) ±19% ▼ à hauteur d'épaule (pic, tous muscles)	Effet ▲ s. de la hauteur de tâche sur les RDP du cou et de l'épaule : OW : [cou = 1.7 (1.7), épaule = 2.4 (2.1)] Ht. Epaule : [cou = 0.4 (0.7), épaule = 1.3 (1.3)]		

Étude et type	Population		Intervention(s)		Tâche(s)			
	Sujets	Âge, Taille et Poids	Exos	Contrôle	Description	Poids de l'outil	Hauteur(s) de tâche	
Van Engelhoven 2019 [37] <i>EECU en ligne de base multiple</i>	14 ♂ Sains, Expérimentés (~10ans) Droitiers	37 ± 13 ans 1.83 ± 0.08 m 81 ± 15 kg	<ul style="list-style-type: none"> EPMS - ShoulderX® (SuitX) 	Sans assistance (0 Nm)	Expérimentale : Ø Tâche simulée de vissage/dévisage répétitif : - Le plus possible en 30 s (~5-10/min) Ø Tâche statique simulée -Traçage : - Tracer une série de lignes en suivant un modèle	<ul style="list-style-type: none"> 0.45 kg 2.25 kg 	Ajustée à chaque sujet pour que la pointe de l'outil touche la zone d'action (90° flexion épaule, 90° flexion coude)	
		Niveau d'assistance	<ul style="list-style-type: none"> 0 Nm 5 Nm 10 Nm 15 Nm 					
Design					Résultats / Contrôle vs EPMS			
16 conditions de 30 secondes, répétées 2 fois par chaque sujet					EMG		Borg – RDP (n=7)	
1^{ère} session : (10 min) Entraînement aux tâches avec et sans EPMS					Côté droit : Deltoïde antérieur Trapèze supérieur Biceps brachial	Deltoïde postérieur Triceps Long chef	Infra-épineux Grand dorsal Fléchisseur superficiel des doigts	Bilatéral : épaule (postérieure et antérieure), bras, cou, dos
2^{ème} session : (~3.5 h)					Entre le pic d'EMG et le médian, les muscles ont montré un comportement similaire. Pour toutes les tâches et poids d'outils EMG amplitude (pic, 90 ^{ème} percentile) (entre respectivement, 0 et 5, 0 et 10, 0 et 15Nm) § Muscles dont l'activité n'a fait que décroître : Deltoïde antérieur : ± 27%, ± 46%, ± 72% ▼ Trapèze supérieur : ± 15%, ± 28%, ± 46% ▼ § Muscles dont l'activité n'a fait qu'augmenter : Triceps long chef : ± %, ± 40%, ± 180% ▲ Grand dorsal : (non significativement) § Muscles avec activité décroissant puis croissante à partir de 15 Nm Biceps, Deltoïde postérieur, Infra-épineux (Cf. Annexe, Figure H)	Selon l'assistance : Entre 0 et 5 Nm : ▼ de toutes les zones. ± 50% ▼ épaule post ± 74% ▼ épaule ant ± 66% ▼ dos ± 23% ▼ cou Entre 5 et 10 Nm : ▲ légère de toutes les zones ± 18% ▲ épaule post ± 66% ▲ dos ± 19% ▲ cou Entre 10 et 15 Nm : ▲ légère de toutes les zones sauf le cou et : ± 31% ▼ dos		
					Tâches (Randomisée) Poids outil (Léger en 1 ^{er}) Niveau d'assistance (Randomisés) Mesure des RDP	Le niveau d'assistance a affecté significativement l'activation moyenne de tous les muscles sauf le Fléchisseur superficiel des doigts et le Grand dorsal. ± 14% pic, 17% médian ▼ tous muscles, pour 5 Nm ± 23% pic, 27% médian ▼ tous muscles, pour 10 Nm ± 25% pic, 32% médian ▼ tous muscles, pour 15 Nm Si les agonistes ▼s. en augmentant l'assistance, c'est l'inverse pour les antagonistes qui ▲s. (Cf. Annexe, Figure I)		

Les 4 études incluses dans la revue sont des *Etudes Expérimentale en Cas Unique (EECU)* ou *Single-Case Experimental Design (SCED)*. Dans ce type d'étude, chaque sujet est son propre témoin et des mesures répétées sont réalisées au cours de l'intervention qui est introduite de manière séquentielle. Il existe différents type d'EECU :

- *L'EECU introduction/retrait* et ses variantes, dans lesquelles l'intervention est introduite puis retirée, pour mieux évaluer l'efficacité d'une aide technique ou d'un dispositif.
- *L'EECU en ligne de base*, consiste à introduire de manière séquentielle une intervention dans des contextes multiples, ou bien plusieurs modules d'une intervention.
- *L'EECU en traitement alternant*, consiste à alterner entre plusieurs types d'intervention (différents types d'Exos par exemple) pour déterminer quelle intervention est la plus efficace.

4.4 Risque de biais des études incluses

4.4.1 Grille d'analyse utilisée

L'analyse critique de la qualité méthodologique des quatre études expérimentales a été effectuée grâce au *Risk of Bias in N-of-1 Trials (RoBiNT) Scale* (Cf. Annexe, Figure F,a et F,b). Les 15 items sont cotés de 0 à 2, ce qui fait un score total sur 30. Cette échelle d'analyse donne des informations pertinentes sur la qualité de la conception et de la réalisation de l'étude mais aussi sur certains biais qui doivent être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

4.4.2 Synthèse des biais identifiés

RoBiNT Scale																
Auteurs	Items															Total
	Validité interne						Validité externe									
	Conception	Randomisation	Échantillonnage	Aveugle	Aveugle	Fiabilité	Adhérence	Caractéristiques	Cadre	Critère de jugement	Intervention	Données brutes	Analyse	Répétition	Généralisation	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Alabdulkarim 2018	2	1	2	0	0	2	2	2	1	2	2	1	2	0	1	22
Gillette 2019	2	0	1	0	2	2	2	1	0	2	2	2	2	0	2	20
Kim (part I) 2018	2	1	2	0	1	2	2	2	2	2	2	1	2	1	1	23
Van Engelhoven 2019	2	2	2	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	0	24
<i>Total</i>	8	4	7	0	4	8	8	7	5	8	8	6	8	2	4	

Les scores obtenus (~ 22.3 [20-24]) peuvent être considérés comme des scores moyens mais qui, en absence d'autres études plus fiables, seront, dans notre situation, tout à fait acceptables.

Certains biais sont clairement visibles à la lecture de ce tableau, par exemple, en ce qui concerne la randomisation des interventions et la mise en aveugle des participants (même si on peut difficilement imaginer la possibilité d'un EPMS « placebo »). La répétition de l'ensemble de l'expérience ou des conditions (Item 14) est un critère de fiabilité des résultats pour les études expérimentales, or deux d'entre elles n'ont pas effectué cette répétition. Les deux autres l'ont réalisé mais en quantité insuffisante.

D'autres biais ne sont pas visibles à travers le RoBiNT Scale et doivent être précisés, notamment ceux concernant les biais de sélection. Chez *Alabdulkarim* et *Kim*, la sélection des sujets a été réalisée de manière pratique incluant des sujets issus de la population d'une université locale (sujets très jeunes et inexpérimentés au travail manufacturier). Même si certaines études (*Van Engelhoven* et *Gillette*) ont choisi leurs sujets parmi des ouvriers du secteur industriel pour avoir une meilleure représentativité de l'échantillon, aucune des quatre études ne décrit vraiment la méthode et le protocole de sélection des sujets. Les sujets intégrés dans l'étude de *Kim* sont venus sur la base du volontariat, ce qui peut présenter un biais supplémentaire. Hormis chez *Kim*, et faute d'information suffisante, il est impossible d'affirmer que la sélection des personnes ne s'est pas faite de manière totalement arbitraire. *Alabdulkarim*, *Kim* et *Van Engelhoven* ont décidé d'exclure les sujets pathologiques (ayant des symptômes ou des antécédents de troubles musculo-squelettiques) ce qui constitue un biais de « bonne santé des sujets ».

De plus, le fait de choisir une population parfaitement mixte (*Alabdulkarim*, *Kim*) ou exclusivement masculine (*Van Engelhoven*) peut constituer un biais, puisque cela ne suit pas une logique d'inclusion aléatoire ou aveugle des sujets.

Pour ce qui est de la mesure de l'activité musculaire (EMG), le choix arbitraire des muscles observés est biaisé de manière inhérente (biais de mesure). Les études se sont plus volontairement focalisées sur les muscles qui interviennent de façon évidente dans l'élévation d'épaule (deltoïde antérieur et moyen, trapèze supérieur) et qui avaient donc de grande chance de voir leur activité réduite par l'assistance de l'EPMS. D'autre part, il faut aussi préciser que le design de l'Exo rend impossible la pose d'électrodes de surface sur certaines parties du corps, empêchant donc le recueil d'activité des muscles concernés.

Les constructeurs d'exosquelettes ont fourni les modèles nécessaires à la réalisation des études de *Gillette* et de *Kim*. Ils ont également partagé des « informations qui ont contribué au design de l'étude ». Les auteurs ont affirmé que personne n'est intervenu dans les mesures, l'analyse et l'interprétation. On peut donc espérer que la participation de ces constructeurs n'a pas influencé les conclusions des auteurs.

5. Discussion

5.1 Une hétérogénéité importante

A cause de la grande hétérogénéité des études, la comparaison statistique des données quantitatives attendues (méta-analyse) ne présentait finalement aucun intérêt clinique. Le regroupement des résultats sous une forme visuelle dans un tableau ou dans un graphique en forêt, n'a pas été effectué, faute de comparabilité des données observées et dans conception des études même des études.

Les résultats obtenus dans les quatre études ne sont tout simplement pas comparables, que ce soit par leur conception, leur méthode de mesure ou le traitement des données. Voici, pour simplifier, une liste des raisons en faveur d'une forte hétérogénéité des études :

Population

- L'hétérogénéité entre les populations des différentes études est un problème surtout en ce qui concerne l'expérience des sujets à une tâche industrielle de type manuelle (ouvriers spécialisés et individus « non compétant ») ainsi que l'âge.

Conception

- Le temps accordé à l'entraînement aux tâches et à l'utilisation de l'EPMS est propre à chaque étude (varie de quelques minutes à plusieurs jours).
- Les temps de pause et de repos entre la réalisation des conditions varient. Cela a une influence importante sur la fatigue musculaire, et donc, sur les mesures d'EMG effectuées et les scores de RPD recueillis.
- Les tâches sont strictement différentes¹⁶, que ce soit par le type, la durée, l'intensité, la hauteur de travail, le poids de l'outil.
- Les modèles d'EPMS étudiés varient ainsi que le niveau d'assistance qu'ils apportent et le degré de confort qu'ils peuvent apporter (*Alabdulkarim* et *Van Engelhoven* : *ShoulderX*, *Gillette* : *Airframe*, *Kim* : *EksoVest* ; Cf. Annexe, Figure B)

Mesure

- Même si les études ont toutes observé des muscles clés identiques¹⁷, certains auteurs ont choisis d'observer l'activité d'autres muscles.
- L'EMG reste une méthode de mesure qui fait rentrer en compte de nombreux paramètres, et qui reste par-ailleurs très opérateur-dépendante : modèle et placement des électrodes, méthode de normalisation (mesure de MVC). Les données recueillies sont échantillonnées, filtrées et lissées selon des modalités choisies par chaque auteur.

¹⁶ Même si la tâche expérimentale est similaire entre *Abdulkarim* et *Kim*, la force de perçage requise est-elle bien différente.

¹⁷ Deltoïde antérieur et Trapèze supérieur

Traitement

- Les données déjà peu comparables ont subi des traitements statistiques répétés (principalement ANOVAs répétées), si bien que les résultats obtenus sont très peu exploitables.

5.2 Analyse des résultats

5.2.1 Anthropométrie

Il est important de mettre ici en lumière une notion cruciale qui a une influence sur les résultats, et qui permet aussi de mieux cerner les interactions de l'EPMS avec son porteur.

Dans une analyse de fin d'étude, *Van Engelhoven* met en évidence l'observation de différents schémas d'activité du triceps. Ces trois schémas se caractérisent par des valeurs d'activation variées, pendant le port de l'EPMS, et quel que soit les conditions de tâches et de poids d'outil (n=14 ♂).

- Le premier schéma (n=3), implique une forte augmentation (▲9-17% MVC) de l'activité du triceps, à travers toutes les conditions de tâches, de poids de l'outil, et en augmentant le PTA
- Le second (n=4), montre une augmentation modérée (▲2-3% MVC) seulement au niveau d'assistance maximum, 15 Nm.
- Le troisième schéma (n=7), regroupe les sujets dont l'activité du triceps reste quasiment inchangée, peu importe le niveau d'assistance (▲<1% de MVC).

Van Engelhoven a ensuite calculé la moyenne des poids des individus dans ces trois groupes pour essayer d'établir un lien. Les poids moyens par schéma d'activité du triceps sont, respectivement 67.8 (±9.5) Kg, et 85.6 (±13.5) Kg et 88.2 (±16.8).

Ces trois poids moyens sont mis en correspondance par l'auteur avec le poids de référence d'un homme américain (*Etats-Unis*) de plus de 20 ans : respectivement, le 12^{ème}, le 50^{ème} et le 54^{ème} centile [43].

$$67.8 (12^{\text{ème}}) < 85.6 (50^{\text{ème}}) < 88.2 (54^{\text{ème}})$$

Pour *Van Engelhoven*, cette observation montre qu'il existe un lien fort entre le poids corporel et l'activité fournie par le triceps (couple fourni pour ramener le bras d'une position d'élévation à la rectitude). La Figure 17, issue des recherches du même auteur, viens conforter cette hypothèse par une estimation des couples pour des individus aux poids corporels très éloignés (5^{ème} et 95^{ème} centile).

Pour bien comprendre, il faut bien distinguer deux phases distinctes dans la mécanique de l'EPMS :

- La phase d'élévation, pendant laquelle le *couple moteur* est fourni par l'EPMS (assistance) plus la force développée par les muscles élévateurs. Le poids du MS et de l'outil constituent le *couple résistant*
- La phase de retour de flexion (à la rectitude), pendant laquelle les rôles s'inversent. Le *couple moteur* est fourni par le poids du MS et de l'outil, plus la force

des muscles extenseurs¹⁸. La résistance mécanique correspondant à la tendance à l'allongement du système ressort de l'Exo, qui devient le *couple résistant* à vaincre par le sujet.

Il existe aussi une contraction concomitante des muscles agonistes, sur un mode excentrique, qui va freiner la descente du MS. Cette activité dépend spécifiquement d'un bon réglage de l'assistance de l'EPMS, mais également de la capacité du sujet à se relâcher pleinement sur le support de l'Exo.

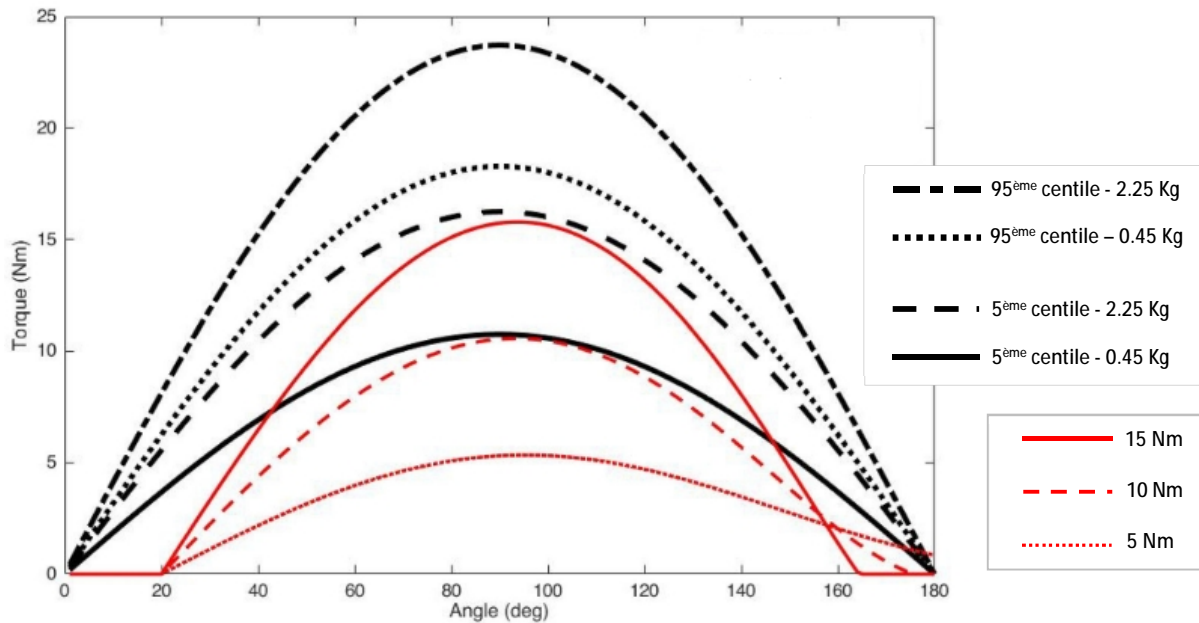
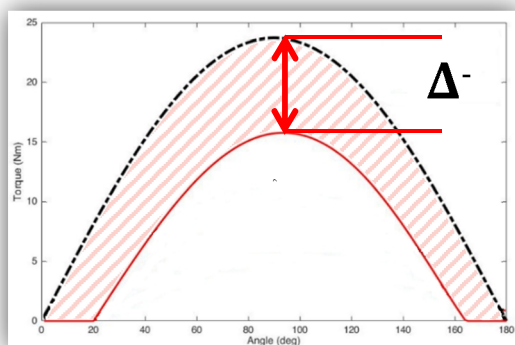


Figure 17 : Courbe des couples en fonction de l'angle d'élevation de l'épaule,

- En noir, le couple fourni par les muscles de l'épaule, estimé pour 5% et 95% des hommes (avec un poids de membres supérieurs respectif de 3.2 et 6.2 kg [43]) avec un outil léger (0.45kg) et lourd (2.25 kg).
- En rouge, le couple moteur d'assistance fourni par l'EPMS (ShoulderX), à différents niveaux d'assistance (5, 10 et 15 Nm)

Cette courbe est riche en informations. Prenons plusieurs cas pour appuyer le propos.

Cas n°1 : Individu plus corpulent (95^{ème} centile) avec l'outil lourd (2.25 kg) et une assistance maximale (15Nm).



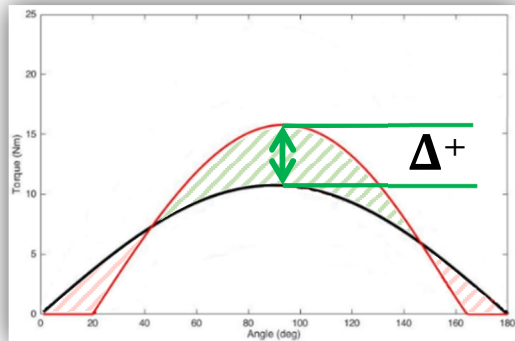
Même l'assistance maximale de l'EPMS ne permet pas de compenser le poids du bras du sujet n°1. Il existe un Δ de couple moteur à fournir par le sujet. Cela implique donc un travail plus important des muscles participants à l'élévation du bras.

A l'inverse, au retour de l'élévation, le poids du bras vaincra sans effort aucun le couple résistant de l'Exo. Les muscles extenseurs du bras seront moins sollicités. Il est fort probable que ce déficit d'assistance entraîne une

¹⁸ et/ou des adducteurs selon la position adoptée

augmentation de charge du travail statique des muscles élévateurs à la position d'action (flexion) et du travail excentrique à la déflexion du MS.

Cas n°2 : Individu peu corpulent (5^{ème} centile) avec l'outil léger (0.45 kg) et une assistance maximale (15Nm).



Le sujet n°2 doit solliciter modérément ses muscles élévateurs jusqu'à 40°. A partir de cet angle, l'EPMS assiste totalement l'élévation du bras. Il apparaît un Δ^+ qui représente un surplus de couple moteur d'assistance, par rapport au faible poids du bras.

C'est d'autant plus de couple résistant contre lequel le sujet devra lutter pour ramener son bras à la rectitude.

On comprend bien donc pourquoi le poids de l'individu a une influence forte sur l'activation des différents groupes musculaires, jusqu'à inverser complètement l'utilité de l'EPMS selon les cas. Les observations des autres auteurs viennent confirmer cette tendance. En effet, *Kim* rapporte un effet significatif entre le poids de l'outil et l'activation musculaire (pic, $F=42.84$ ($p<0.0001$, $\eta^2=0.16$), qui est également validé chez *Alabdulkarim* sur tous les muscles, par exemple le deltoïde antérieur (pic, $p<0.0001$, $\eta^2_p=0.16$).

De manière purement analytique, on peut associer les poids moyens de chaque étude avec la table de poids de référence utilisée précédemment. On observe des différences :

- *Alabdulkarim* : 72 kg à [15^{ème}-25^{ème}] centiles
- *Gillette* : 76 kg à [15^{ème}-25^{ème}] centiles
- *Kim* : 68 kg à [10^{ème}-15^{ème}] centiles
- *Van Engelhoven* : 81 kg à [25^{ème}-50^{ème}] centiles

Les études se rapprochent plus de la situation du cas n°2, c'est-à-dire des sujets plutôt peu corpulents. Malgré tout, les poids moyens des études ne semblent pas assez extrêmes pour avoir une incidence telle qu'elle expliquerait des contradictions dans les valeurs d'activation musculaire mesurées. Il faut également préciser que les populations des études ne sont pas systématiquement représentatives d'une population de travailleurs plus âgés, et hypothétiquement plus corpulents que de jeunes étudiants universitaires (*Alabdulkarim*, *Kim*). D'autre part, ces études ont exclu toute personne présentant des comorbidités. Et même si cela n'est pas précisé implicitement, les personnes de trop fort ou trop faible poids corporel ne sont pas représentées ici.

Par ailleurs, il est fort probable que les différences inter-sexes concernant le poids corporel puissent expliquer certaines variations dans les résultats d'EMG des études. *Alabdulkarim* a observé une augmentation de $\pm 25\%$ de l'activité du triceps brachial (médius, toutes conditions de poids d'outils) uniquement chez les femmes (poids moyen de 66 ± 12 kg chez les femmes, contre 78 ± 13 kg chez les hommes). L'expérience de *Kim* intègre également

des sujets féminins, avec une tâche expérimentale similaire à celle d'*Alabdulkarim*. Cependant, il ne réalise pas dans l'analyse statistique de comparaison inter-sexe, ce qui aurait pu se montrer utile pour confirmer plus amplement cette hypothèse.

Par ailleurs, il faut préciser ici que le poids du bras n'est pas le seul facteur à prendre en considération. La taille de l'individu, et notamment la longueur du MS, est une mesure qui a également son importance. En effet, en mécanique, la notion de couple (Nm) désigne une force (N) exercée avec une certaine distance de bras de levier (m). Avec un même poids de MS et pour poids d'outil identique, un individu au MS plus long devra développer plus de couple pour lever l'outil, par rapport à un individu au MS plus court. Le travail musculaire à fournir sera donc plus important.

Cette analyse permet donc de comprendre le rôle clé que joue l'anthropométrie de l'individu dans le fonctionnement de l'EPMS. Il faut également prendre en considération le paramètre primordial que constitue le niveau d'assistance qui, par ailleurs, peut revêtir une multitude de valeurs selon les modèles¹⁹.

A la lumière de ces observations, il est maintenant plus aisé de comprendre et de comparer les résultats observés dans les différentes études.

5.2.2 Muscles agonistes

En ce qui concerne, les muscles observés dans les études, les effecteurs de l'élévation du bras (deltoïde antérieur et moyen, biceps brachial) et les stabilisateurs/ajusteurs (trapèze supérieur), il y a une tendance à une diminution générale de l'activité musculaire.

Concernant le muscle clé, le deltoïde antérieur, visé directement par l'action de l'EPMS, les études s'accordent sur une réduction générale. Cependant, l'intensité et la signification des valeurs trouvées varient. Quel que soit le poids de l'objet, une réduction significative du pic d'amplitude du Deltoïde antérieur droit ($\pm 18\% \blacktriangledown$), et gauche ($\pm 26\% \blacktriangledown$), a été observée par *Abdulkarim*. Avec un protocole expérimental quasiment similaire, *Kim* trouve une diminution du pic de $\pm 28\%$ pour ce même muscle. *Van Engelhoven*, reporte également une diminution du Deltoïde antérieur, d'autant plus importante que l'assistance augmente.

Pour ce qui est du Deltoïde moyen, *Abdulkarim* et *Kim* obtiennent des valeurs concomitantes (*respectivement*, $\pm 26\% \blacktriangledown$ (D), $\pm 28\% \blacktriangledown$ (G) ; $\pm 26\% \blacktriangledown$ (D), $\pm 28\% \blacktriangledown$ (G)).

Ces diminutions d'activité du deltoïde antérieur et moyen sont en faveur d'une réduction locale de la fatigue musculaire de ces muscles, qui sont particulièrement sollicités pendant l'élévation du bras. L'assistance semble donc bien être délivrée que ce soit dans la flexion ou dans l'abduction de gléno-humérale.

¹⁹ Le réglage du ShoulderX se fait, comme pour l'EksoVest, sur une échelle de valeurs continues. Les niveaux d'assistance ont ici été choisis arbitrairement par l'auteur pour représenter son étendue.

Concernant le biceps brachial, les mesures indiquent que l'EPMS a moins d'impact sur ce muscle. *Van Engelhoven* observe une diminution non-significative alors que *Gillette* constate une légère réduction significative ($p=0.02$) en fin de journée en ayant utilisé l'Exo. Encore une fois, les tâches varient bien trop entre les études concernées pour confirmer ces observations. D'autre part, le biceps est un muscle bi-articulaire, également engagé dans des tâches de manutention qui sollicite l'ensemble des chaînons que constitue le MS. En fonction du poids à porter, et des contraintes en flexion de coude, l'action du biceps varie. Concernant ce muscle, il aurait été intéressant de disposer de plus d'observations issu d'autres études pour mieux apprécier concrètement son activité.

Le trapèze supérieur, qui participe à la stabilisation du moignon de l'épaule pendant l'élévation et plus particulièrement à l'extension cervicale caractéristique à l'*overhead work*, voit son activité diminuer. Les deux auteurs qui s'intéressent à ce muscle ont mesuré une réduction de même ordre du pic d'EMG ($\pm 48\% \blacktriangledown$ chez *Van Engelhoven*, et $\pm 32\% \blacktriangledown$ chez *Kim*, toutes conditions confondues).

5.2.3 Muscles antagonistes

Le triceps brachial est le principal muscle antagoniste observé à travers les études. Son comportement varie de manière importante entre les études si bien que les valeurs observées sont extrêmement contradictoires.

Van Engelhoven observe un accroissement significatif d'activité de la longue portion du triceps en augmentant le niveau d'assistance ($\pm 15\%$, $\pm 28\%$, $\pm 46\% \blacktriangle$; respectivement entre 0-5, 5-10 et 10-15 Nm). Cette forte augmentation peut être expliquée par un sur-réglage de l'assistance, et d'autre part, des poids d'outils utilisés parmi les plus légers des études (0.45 et 2.25 Kg).

Chez *Alabdulkarim*, l'augmentation de $\pm 18\% \blacktriangle$ du triceps qui a été observée, chez les femmes uniquement (pic, pour les deux poids d'outils), peut être expliquée par un poids corporel potentiellement moins important. Cependant, en absence de données anthropométriques intra-sexe, ainsi que d'indications concernant le niveau d'assistance (*choisie par le sujet*), il est impossible d'imputer cette augmentation à un élément précis.

Les études d'*Abdulkarim* et *Kim* sont presque en tout point similaires s'agissant du design de la tâche expérimentale de perçage (seule la force de pression requise pour la simulation de perçage varie, respectivement $F \geq 66.7$ N et $F \geq 111.2$ N).

La ressemblance de ces études était donc en faveur d'une similitude dans les résultats obtenus. Cependant, les résultats que rapporte *Kim* sont quelque peu contradictoires avec ce qu'a pu observer *Abdulkarim* précédemment. *Kim* indique lui, une diminution de $\pm 46\% \blacktriangledown$ du pic d'amplitude du triceps (D), pour toutes conditions de tâches et de hauteur confondues. Cette observation est étonnante à plusieurs titres. D'une part, le poids moyen des sujets de l'étude est assez faible (68 ± 8 kg), ce qui va plutôt dans le sens d'une augmentation du couple moteur à fournir par les muscles extenseurs du sujet pour revenir à une position neutre.

D'autre part, s'il y a une réduction importante d'activité du triceps, on peut s'attendre indirectement à ce que l'assistance soit « sous-réglée », et donc que les muscles agonistes travaillent plus. Cela n'est pas du tout le cas, avec des diminutions d'activité des muscles agonistes quasiment toujours plus importantes chez *Kim* par rapport à chez *Abdulkarim*. Par ailleurs, les diminutions calculées sont des moyennes des diminutions obtenues à travers toutes les conditions expérimentales. Or, *Kim* ajoute une tâche expérimentale de câblage qui n'existe pas dans l'étude de *d'Abdulkarim*. Cette tâche se réalise sans outil. On peut donc s'attendre, que pour une même assistance, le triceps soit encore plus sollicité qu'au cours de tâches de perçage avec un poids d'outil. Il faut tout de même considérer le poids important des outils utilisés chez *Kim* (3.6 kg et 5.9 kg, les plus lourds de toutes les études), qui sont susceptibles de plus compenser le couple résistant de l'Exo et donc diminuer l'activité du triceps.

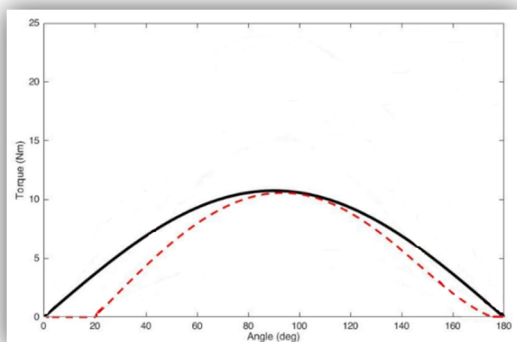
Aussi, il est fort probable que les variations expérimentales de hauteur de tâches dans l'étude de *Kim* entraînent des modifications dans l'activation musculaire.

Concernant les autres muscles antagonistes, *Van Engelhoven* a observé une diminution légère mais significative entre tous les niveaux d'assistance (0-5, 5-10, 10-15 Nm). Cela peut s'expliquer par l'action d'abduction d'épaule du deltoïde postérieur, qui est donc sollicité au cours des tâches d'overhead work. Aucun changement n'est observé pour le grand dorsal.

5.2.4 Une assistance idéale

En l'absence d'information, dans certaines études, concernant l'intensité d'assistance (*Alabdulkarim*, *Gillette* et *Kim*), on ne peut que s'interroger sur l'ampleur de sa répercussion sur les résultats obtenus finalement. Malgré tout, on peut maintenant affirmer qu'une assistance trop faible ou bien trop élevée pourrait influencer, de la même manière que le poids, les schémas d'activation musculaire globaux, et l'effort que chaque muscle doit fournir de manière analytique.

En se basant sur les courbes et les observations précédentes, on peut proposer une assistance « idéale », juste assez supérieure au couple résistant du bras et de l'outil pour permettre au sujet de lever le bras sans effort, sans pour autant ajouter trop de charge aux muscles extenseurs qui vont ramener le bras à une position de rectitude.



Par exemple, cette courbe illustre une situation où l'assistance est bien calibrée, de manière à faire travailler équitablement les groupes musculaires agonistes par rapport aux antagonistes.

Pour optimiser la réduction de l'activité des agonistes, *Van Engelhoven* suggère de la même manière que l'assistance soit réglée à

un niveau maximum tout en gardant une activité constante des muscles antagonistes, pour les préserver également. Dans son étude, l'assistance de l'EPMS (5, 10, 15Nm) est un paramètre qui permet de varier les conditions expérimentales. A la fin de l'expérience, l'auteur a recueilli les préférences des sujets concernant le niveau d'assistance et il a fait une observation intéressante. Il a constaté que le niveau d'assistance n'a pas été choisi sur la seule base de la réduction de l'activité des muscles fléchisseurs, car tous les participants ont montré la plus grande réduction du deltoïde antérieur au niveau d'assistance le plus élevé. Au contraire, il suggère que le niveau d'activité des muscles extenseurs de l'épaule, ou alors l'équilibre entre réduction des fléchisseurs et augmentation des extenseurs, ait déterminé les préférences des sujets en matière d'assistance. Ces observations viennent donc en partie confirmer la proposition d'un réglage « idéal » qui respecterait l'équilibre entre agonistes et antagonistes.

5.2.5 Hauteur de tâche

Si le poids de l'outil et l'assistance ont une influence sur l'activation musculaire, il en est de même pour la hauteur de la tâche.

En se référant à la Figure 17 (p. 37), il apparaît bien que le couple résistant que représente le poids du bras et de l'outil pendant la flexion, augmente de manière concourante de l'angle d'élévation du bras. Arrivé à 90°, le poids du bras est maximal (pesanteur maximale). Au-dessus, il décroît jusqu'à 180 ° et en dessous, il décroît également jusqu'à 0°.

Kim s'est appliqué à étudier les variations induites par une modification de la hauteur de travail. Dans son étude, il existe deux hauteurs. La première est fixée à hauteur d'épaule si bien que la zone d'action de l'outil se retrouve à la hauteur de l'acromion du sujet, ce qui correspond à une flexion d'épaule inférieure à 90°. La seconde est une hauteur type d'overhead work, calculée à partir de mesures anthropométriques, à laquelle l'épaule est fléchie à plus de 90°.

L'auteur a mesuré un effet significatif de la hauteur sur les contraintes ressenties par le sujet, à travers le RDP de Borg :

- Hauteur d'épaule : [cou = 0.4 (0.7), épaule = 1.3 (1.3)]
- Overhead work : [cou = 1.7 (1.7), épaule = 2.4 (2.1)]

Kim a également observé un effet significatif de la hauteur de tâche sur les valeurs de pic d'amplitude d'EMG, pour tous les muscles ($F=60.91$ ($p<0.0001$, $\eta^2=0.32$)). Pour l'ensemble des muscles et sur l'ensemble des conditions expérimentales, il a mesuré une diminution de $\pm 33\%$ du pic d'amplitude à hauteur d'overhead work, contre $\pm 19\%$ à hauteur d'épaule.

Bien qu'il manque de nombreuses informations concernant le niveau d'assistance, le poids de l'outil et la description des tâches, l'étude de *Gillette* est utile, car six tâches différentes sont présentées, avec des hauteurs différentes. Il apparaît que les tâches impliquant une flexion importante d'épaule sont plus susceptibles de bénéficier de l'assistance de l'EPMS.

Les tâches d'assemblage automobile et d'assemblage hydraulique impliquent des mouvements répétitifs en overhead work. Ce sont les tâches pour lesquelles l'utilisation de l'EPMS a diminué le plus l'activation musculaire du deltoïde antérieur (respectivement, pic $\pm 34\%$ et $\pm 32\%$ ▼). Le risque de fatigue du deltoïde antérieur passe en dessous de la limite de TLV grâce à l'EPMS, pour ces deux tâches.

Trois autres tâches présentent une diminution similaire mais légèrement moins importante : suspension, peinture et soudure (respectivement, pic $\pm 10\%$, $\pm 14\%$ et $\pm 14\%$ ▼). Pour ces tâches, le risque de fatigue du deltoïde antérieur reste sous la limite du TLV, car il y était déjà en condition contrôle. Ces trois tâches impliquent des mouvements succincts d'élévation de bras, à une hauteur variable entre un niveau d'hauteur d'épaule et une hauteur d'overhead work.

Une dernière tâche, l'assemblage d'aile, implique des mouvements strictement en dessous du niveau des épaules. C'est la seule tâche qui a enregistré une augmentation d'activité du deltoïde antérieur avec l'utilisation de l'EPMS ($\pm 14\%$ ▲). Le risque de fatigue du deltoïde est passé sous le TLV indiquant une utilisation inappropriée de l'EPMS.

En conclusion, la hauteur de la tâche a bien une importance cruciale dans la réduction effective de l'activité musculaire des agonistes. D'autre part, cela montre que l'EPMS est un outil dédié et particulièrement performant pour le travail avec les bras au-dessus de la tête. Il reste viable pour un travail impliquant des flexions répétées dans une amplitude entre 45° à 90° d'élévation de bras dans laquelle il diminue tout de même l'activité musculaire des agonistes. Cependant, il n'est pas du tout adapté à une tâche qui engage l'épaule dans une plage articulaire inférieure à 45° de flexion. Dans cette situation, l'EPMS se trouve dans un secteur angulaire où son assistance est tout simplement nulle²⁰, comme on peut le voir dans la Figure 17 (p.37).

5.2.6 Rating of Perceived Discomfort

Les résultats observés concernant les RDP sont quelque peu disparates et nuancés. *Kim* a mesuré une diminution significative uniquement pour l'avant-bras, surtout avec un outil plus lourd ($\pm 35\%$ ▼). Pour un même modèle d'EPMS, *Alabdulkarim* a lui observé une plus légère augmentation pour main/poignet ($\pm 8\%$ ▼) et le bras ($\pm 20\%$ ▼), mais aussi un accroissement de l'inconfort pour la zone de l'épaule ($\pm 6\%$ ▼).

Van Engelhoven a trouvé une réduction d'inconfort pour toutes les zones étudiées, surtout au plus faible niveau d'assistance, 5 Nm ($\pm 50\%$ ▼ épaule postérieure, $\pm 74\%$ ▼ épaule antérieure, $\pm 66\%$ ▼ dos, $\pm 23\%$ ▼ cou). Pour une assistance plus forte, la diminution des RPD est moins nette et pour 15 Nm d'assistance, une légère augmentation est même observée. L'auteur explique ce changement par l'augmentation de charge des muscles extenseurs qui doivent combattre une assistance trop forte.

L'utilisation du RDP a été remis en cause par *Kim*. Il explique que les courtes durées des tâches expérimentales (de l'ordre de quelques minutes) ne sont pas assez contraignantes et ne permettent donc pas d'atteindre une fatigue suffisamment importante. Le recueil des

²⁰ Assistance nulle jusqu'à 20° d'élévation.

RPD au cours d'une tâche plus longue, qui se rapprocherait plus d'une tâche professionnelle, serait plus pertinent. Il serait également envisageable de prendre des mesures à des moments donnés de la journée de travail, comme sur le schéma d'expérimentation de *Gillette*, pour mieux observer des modifications plus effectives.

D'autre part, il faut préciser qu'une tâche, qu'elle soit expérimentale ou « réelle », peut être découpée en plusieurs phases, dans lesquelles les mouvements, les sollicitations et les postures seront bien différentes. Il est donc possible que l'inconfort varie grandement entre différentes phases d'une tâche, ce qui n'est pas du tout pris en compte dans le recueil des RDP, dans les études analysées.

En vérité, le RDP ne nous donne pas uniquement une indication sur la réduction d'effort musculaire mais également sur le confort ou l'inconfort apporté par l'Exo. Il est donc difficile de distinguer l'impact de l'un ou de l'autre sur les scores obtenus finalement.

En effet, il est possible que le confort varie d'un modèle à un autre, en fonction de la qualité du rembourrage des bracelets. Dans ce sens, il a été rapporté qu'un mauvais couplage avec le sujet peut induire un inconfort important, particulièrement au niveau des zones d'interface avec l'EPMS (bras principalement). Dans l'étude de *Van Engelhoven*, il apparaît que les sujets de plus petite taille ont exprimé un inconfort plus grand, imputé selon l'auteur, à un mauvais réglage de taille des différents composants de l'appareil.

Le RDP qui semblait à l'origine un moyen intéressant pour déterminer une évolution de perception de la fatigue musculaire locale, ne semble alors plus tellement utile, du fait de son manque de signification clinique. Il reste tout de même un moyen valable pour déterminer l'influence de l'Exo sur le sujet et son acceptation vis-à-vis de l'appareil.

5.2.7 Habileté

Dans la mesure où le niveau de compétence et d'habileté nécessaire à réaliser une tâche manuelle donnée est supposé plus élevé chez un ouvrier expérimenté par rapport à un individu sans expérience, il est justifié de se demander si cela ne crée pas de différence, d'une part entre les différentes études, mais surtout, entre les études et la réalité. Selon la difficulté de la tâche, l'influence pourrait être d'autant plus grande.

Kim et *Alabdulkarim* ont tous deux intégré dans leurs études des sujets issus d'une université locale, très jeunes (respectivement 27 ± 7 ans et 23 ± 2 ans). Ce sont donc des personnes non-entraînées, dont le manque d'expérience pourrait avoir une influence, au cours des tâches, sur le schéma moteur et le recrutement musculaire, entre la condition de contrôle et la condition d'intervention. A l'inverse chez *Gillette* et *Van Engelhoven*, ce sont de véritables ouvriers, plus âgés et expérimentés du secteur automobile ou industriel (respectivement 41 ± 7 ans et 37 ± 13 ans).

Quoiqu'il en soit, aucun sujet n'était familier à l'utilisation de ce type d'Exo. Un temps de familiarisation à l'utilisation de l'EPMS a systématiquement été accordé avant le début de la véritable expérience. Cependant, ce temps d'entraînement a varié entre les études (*Abdulkarim* : « autant que souhaité » mais en réalité plutôt 10 min, *Gillette* : « plusieurs journées de travail », *Kim* : 40 min, *Van Engelhoven* : 10 min).

Un point intéressant a été soulevé par *Van Engelhoven*. Ce dernier a constaté, de manière tout à fait subjective, que certains sujets ont pu être plus à l'aise avec l'utilisation de l'Exo en relâchant bien le poids du bras dans l'appareil, tandis que d'autres ont moins bien réussi à se détendre et ont forcé inutilement contre le support. Il émet donc l'hypothèse qu'un entraînement accru ou une utilisation prolongée de l'EPMS permettrait de réduire l'activité des muscles antagonistes au fil du temps.

Ce manque d'entraînement ou d'habileté à l'utilisation de l'Exo pourrait donc potentiellement être à l'origine de variations dans les résultats observés dans cette revue.

5.2.8 Réduction des contraintes rachidiennes

Une hypothèse a été émise par *Gillette* concernant une modification potentielle dans la statique du tronc. En temps normal, la flexion du MS entraîne des répercussions au niveau des muscles extenseurs du rachis. Le couple gravitaire généré par un bras tendu à 90° de flexion d'épaule (par exemple, couple maximum) va solliciter ces muscles extenseurs dans une réaction de stabilisation du tronc pour éviter au corps de s'écrouler vers l'avant. Avec l'EPMS, ce couple résistant est grandement diminué, ce qui préviendrait également les contraintes aux niveaux du dos et des lombaires. La diminution d'activité musculaire du trapèze vient incrémenter cette hypothèse d'une réduction d'effort des m. extenseurs ($\pm 48\%$ ▼ chez *Van Engelhoven*, et $\pm 32\%$ ▼ chez *Kim, pic, toutes conditions confondues*). Pour *Gillette*, l'EPMS permettrait donc de maintenir une « bonne posture » du dos. Il semblerait que les structures de l'Exo et les coupleurs corporels concourent à une certaine rigidité, bénéfique à la statique du tronc.

Pour sa part, *Alabdulkarim* a observé une réduction significative de la contrainte perçue au niveau lombaire chez les hommes de son étude ($\pm 30\%$ ▼ toutes conditions). Une même diminution est recueillie dans une autre étude, mais pour un faible niveau d'assistance seulement (*Van Engelhoven* : $\pm 66\%$ ▼dos). Pour ce qui est de l'activation musculaire, et bien que ces résultats ne soient pas significatifs, *Alabdulkarim* et *Gillette* mesurent tous les deux une diminution d'activité respective du muscle ilio-lombaire ($\pm 15\%$ ▼ pic, toutes conditions) et des paravertébraux lombaires (ns.).

Une mesure réalisée par *Kim* dans une toute autre étude (*Kim 2018 – Part II, [39]*) semble corroborer cette hypothèse. Ce dernier a mesuré une réduction de charge sur la colonne vertébrale avec le même modèle d'EPMS (EksoVest).

Malgré tout, il est impossible de valider catégoriquement l'hypothèse d'une réduction des contraintes vertébrales. Des recherches futures permettront peut-être de mieux comprendre les répercussions des EPMS sur la statique rachidienne et les modifications posturales.

5.2.9 Autres notions

La performance de l'EPMS est également étudiée à travers un protocole de repérage d'erreur. Cela a été effectué dans l'étude de *Kim* et d'*Abdulkarim*, dans laquelle un contact avec la mauvaise angulation ou au mauvais endroit de la sonde placé au bout de la « fausse » perceuse, était signalé par un stimulus auditif et ainsi comptabilisé comme erreur. Cette notion de performance se retrouve aussi chez *Van Engelhoven* qui a relevé le nombre d'erreurs commises au cours de son expérimentation avec le nombre de tâches réalisées en une minute (x perçage/min).

D'autres auteurs ont effectué une analyse des modifications cinétiques de l'utilisation de l'EPMS à travers leurs études, en utilisant des capteurs corporels, des caméras et un logiciel d'analyse. *Van Engelhoven* observe dans son étude un changement dans le mouvement de certains des sujets : ils gardent les bras tout le temps en abduction (pour éviter de lutter contre le couple résistant de l'Exo).

L'intensité de ces réponses posturales dépend directement de la vitesse du mouvement initié, des forces exercées par le mouvement et de l'inertie des segments mobilisés. Il semble donc probable que l'utilisation d'un EPMS puisse avoir des conséquences considérables sur les ajustements posturaux au cours d'une tâche. Comme il a été rapporté dans plusieurs études concernant les EPMS (*Theurel, Kim, Nussbaum, Van Engelhoven*), l'utilisation de l'Exo a entraîné des augmentations dans la magnitude et la vitesse des oscillations posturales. *Theurel* (2018) a également constaté une augmentation de l'activité des muscles extenseurs plantaires lors d'une tâche effectuée avec l'Exo, suggérant ainsi une augmentation de la demande appliquée à toute la chaîne posturale postérieure.

La collision avec l'environnement de travail est une préoccupation qui a fait occurrence à travers les études. Les sujets se sont montrés soucieux des risques entraînés par une utilisation de l'EPMS dans un environnement encombré ou restreint. Il est vrai qu'un mauvais contrôle de ses mouvements et de l'Exo pourrait entraîner un risque de collision accru. Cela est d'autant plus risqué que l'environnement de travail est celui d'une usine où de nombreux risques sont présents (objets contendants, tranchants, thermiques).

5.3 Applicabilité sur le terrain

Tout d'abord, il faut préciser que le nombre très réduit de sujets inclus dans les études est un problème si on veut généraliser des résultats observés expérimentalement. On peut considérer que cela constitue un biais de publication de la revue et cela nuit nettement à toute signification clinique et validation unanime de l'efficacité des EPMS. En l'état actuel des connaissances, ce manque général d'informations empêche l'applicabilité clinique et écarte toute possibilité d'avancer des conclusions catégoriques. Les études analysées ici s'inscrivent dans une approche qui se veut « explicative ». Les auteurs essaient d'apporter leur pierre à l'édifice plutôt que de donner des valeurs intéressantes d'un point de vue clinique. Il faut

garder à l'esprit que les EPMS, sont des dispositifs récents qui sont, pour le moment, très peu étudiés, malgré leur présence in-situ dans le secteur de l'industrie.

Cependant, la mise sur le marché précoce de ces dispositifs, sans de solides études thérapeutiques préalables, fait douter de leur véritable efficacité. Si des brevets ont bel et bien été déposés pour les différents modèles, le manque de recommandations et d'avis éclairés d'experts et d'organismes publics illustre l'absence totale de consensus au sujet des EPMS.

Cela traduit aussi la nuance réglementaire qui peut exister entre les dispositifs médicaux et les dispositifs ergonomiques. Ces derniers ne doivent pas respecter le même cahier des charges et ne sont pas évalués préalablement avec la même rigueur scientifique et médicale.

Avec leur prix élevé²¹, les EPMS restent des dispositifs peu accessibles au grand public. Ils sont plutôt destinés aux entreprises qui souhaitent équiper leur personnel pour améliorer les conditions de travail tout en réduisant également l'incidence économique considérable des TMS sur leurs finances.

Si la prudence est de mise en France, de grandes entreprises ont déjà franchi le pas et implanté des exosquelettes sur leurs autres sites européens [15]. Dans le secteur industriel, leur introduction en masse (plusieurs dizaines ou centaines d'exemplaires) sur site, résulte bien souvent d'une décision prise au sommet hiérarchique de grands groupes industriels (par exemple Ford, Nissan, Toyota). Ce désir d'équiper le plus de personnel possible, montre d'une part l'attrait que peuvent représenter les EPMS pour ces entreprises, mais aussi qu'il existe un intérêt préventif supposé.

L'introduction d'EPMS en milieu professionnel est une action qui se veut préventive par l'amélioration potentielle des conditions de travail et de la santé des travailleurs. Mais, il ne faut pas oublier que cela peut également constituer un moyen d'augmenter le rendement et la productivité des ouvriers. Or, il semblerait que cette introduction de masse soit quelque peu brusquée et va à l'encontre des principes même de la prévention. Cela met donc en doute le bien-fondé d'une démarche qui se voudrait illégitimement préventive et protectrice. La prévention doit être réalisée de manière consciencieuse, en étudiant l'individu dans son environnement, et en prenant en compte de manière personnelle ses caractéristiques et ses attentes.

Par ailleurs, nous avons vu précédemment la nécessité d'un bon réglage d'assistance ainsi que l'importance d'utiliser l'EPMS dans le cadre strict d'une tâche donnée. Si cette utilisation s'écarte des bons réglages et pour des types de tâches prévues, on s'expose à une augmentation des contraintes, et donc, à un risque réel pour le travailleur. Il est alors justifié de se demander, s'il existe bien un intérêt thérapeutique pour chaque ouvrier à bénéficier de cet appareil. En l'état actuel des connaissances, il y a fort à parier qu'il existera sur site des lacunes dans la compréhension du fonctionnement et dans le réglage de l'EPMS, entraînant peut être des utilisations inappropriées.

²¹ de 3000 à 7000 € selon les modèles (*prix unitaire*).

« Les effets de leur introduction à un poste doivent être évalués et suivis dans le temps. Les entreprises sont encore dans l'expérimentation avec ces dispositifs »

Jean-Jacques Atain-Kouadio, expert assistance INRS [15].

Quoi qu'il en soit, à l'avenir, dans l'hypothèse où ces dispositifs prouveraient pleinement leur potentiel en réduisant les TMS, sans en créer, le bénéfice apporté serait considérable. Si on met en balance le prix d'un EPMS (bien que toujours élevé) avec le coût total considérable que constitue une pathologie musculo-squelettique incapacitante, il est certain que ces Exos pourraient représenter un apport non négligeable dans la lutte sanitaire et économique contre les TMS.

5.4 Recherches futures

Même si cette revue ne se focalise que sur l'observation de deux paramètres choisis, on peut tout de même élargir le propos et s'accorder sur le fait que de plus amples études seront nécessaires pour mieux comprendre les interactions entre l'homme et l'appareil.

Des études plus longues et plus rigoureuses permettraient d'évaluer l'influence des Exos sur :

- la fatigue au long terme, l'apparition ou-non de TMS et les éventuelles pathologies induites,
- le schéma moteur, les synergies musculaires et leurs modifications,
- la cinétique du geste et les stratégies de mouvements adoptées,
- la proprioception, le contrôle et les adaptations posturales,
- la pénibilité ressentie du travail et la productivité.

En outre, les études n'ont porté que sur un petit nombre de sujets en bonne santé. Les effets de l'exosquelette sur une population plus importante devraient être étudiés, en prenant en considération les différences d'anthropométrie inter-individus et inter-genres, ainsi que le type de tâche et le poids de l'outil. Les ouvriers spécialisés, les travailleurs âgés et ceux présentant des pathologies associées ou comorbidités, mériteraient d'être également inclus dans de futures études ; le soutien des exosquelettes pourrait contribuer à maintenir ces travailleurs fragilisés dans la population active.

5.5 Biais potentiel de la revue

La qualité méthodologique propre à la revue de littérature a été évaluée en utilisant *AMSTAR 2* (2017), une grille d'analyse dédiée. Cette grille à seize items offre trois options de réponse : Oui, Oui partiel ou Non. *AMSTAR 2* ne vise pas une note mais permet tout de même de donner un aperçu des biais présents dans une revue.

AMSTAR 2		
n°	Question	Réponse
1	Les questions de recherche et les critères d'inclusion de la revue comprenaient-ils les éléments de PICR ?	Oui
2	Le rapport de la revue contenait-il un énoncé explicite selon lequel les méthodes de la revue ont été établies avant sa réalisation, et le rapport justifiait-il tout écart important par rapport au protocole ?	Oui
3	Les auteurs de la revue ont-ils expliqué leur choix des modèles d'étude inclus dans la revue ?	Oui
4	Les auteurs de la revue ont-ils eu recours à une stratégie exhaustive pour leur recherche de littérature ?	Non, seulement PubMed, Cochrane, Pedro, Kinédoc et Google Scholar
5	Les auteurs de la revue ont-ils réalisé la sélection des études en double ?	Non
6	Les auteurs de la revue ont-ils effectué la récupération des données en double ?	Non
7	Les auteurs de la revue ont-ils fourni une liste des études exclues et une justification de leur exclusion ?	Oui
8	Les auteurs de la revue ont-ils décrit suffisamment en détail les études incluses ?	Oui
9	Les auteurs de la revue ont-ils employé une technique satisfaisante pour évaluer le risque de biais des études individuelles incluses dans la revue ?	Oui
10	Les auteurs de la revue ont-ils mentionné les sources de financement des études incluses ?	Non
11	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs de la revue ont-ils utilisé des méthodes appropriées pour réaliser une combinaison statistique des résultats ?	
12	Si une méta-analyse a été effectuée, les auteurs de la revue ont-ils évalué les effets potentiels du risque de biais des études individuelles sur les résultats de la méta-analyse ou d'autres synthèses des données probantes ?	
13	Les auteurs de la revue ont-ils tenu compte du risque de biais dans les études primaires au moment d'interpréter ou de discuter des résultats de la revue ?	Oui
14	Les auteurs de la revue ont-ils expliqué et analysé de façon satisfaisante toute hétérogénéité observée dans les résultats de la revue ?	Oui
15	S'ils ont réalisé une synthèse quantitative, les auteurs de la revue ont-ils effectué un examen adéquat du biais de publication (biais résultant de la petite taille des études) et abordé ses effets probables sur les résultats de la revue ?	Oui
16	Les auteurs de la revue ont-ils déclaré toutes les sources potentielles de conflits d'intérêts, y compris le financement reçu pour réaliser la revue ?	

Le choix, très arbitraire mais assumé, de choisir seulement deux critères de jugement (EMG, Borg) est inhéremment biaisé. Cela constitue un biais de publication de la revue. Une analyse d'efficacité complète aurait nécessité de prendre en considération de nombreux paramètres qui n'auraient pu trouver leur place dans le cadre de ce travail. L'absence de données statistiques fiables et d'analyse statistique comparative, diminue nettement la qualité finale de la revue en excluant la possibilité d'établir des conclusions formelles.

Ni la sélection des études, ni la récupération des données n'ont été effectuées en double. Cela ne rentrait de toute façon pas dans le cadre du travail demandé.

6. Conclusion

Le manque de données statistiques exploitables et de comparabilité entre les études, pointe du doigt l'absence totale d'évaluation et donc de consensus quant à l'efficacité de ces Exos. Ils constituent un sujet vierge dont les nombreux points d'ombre doivent encore être éclaircis par des études ultérieures, pour permettre de mieux comprendre les interactions entre l'homme et l'appareil, et ainsi établir des conclusions formelles.

Quoiqu'il en soit, à travers le questionnement de la littérature, certaines tendances semblent se dessiner. Les auteurs s'accordent tous en faveur d'une diminution significative de la charge de travail des muscles élévateurs du MS. L'EPMS semble alors bien apporter l'assistance qu'il promet, en réduisant efficacement, parfois de manière considérablement, l'activité de ces muscles. Certaines observations suggèrent également une diminution potentielle d'activité des muscles extenseurs du rachis, notamment au niveau cervical (trapèze supérieur).

Cependant, cette réduction d'activité s'est parfois accompagnée de la création de foyers de contraintes sur d'autres zones corporelles. Une occurrence apparaît concernant l'augmentation de charge des muscles extenseurs de l'épaule, notamment le triceps brachial. Ces observations nous ont conduit à constater que si l'Exo délivrait bien une assistance à l'élévation, il générerait de la même manière une résistance à l'extension, augmentant de façon inévitable la contrainte des muscles concernés. Plus d'études centrées sur l'activité des muscles antagonistes ou distants de l'épaule, sont nécessaires pour permettre de mieux apprécier et quantifier l'augmentation de l'effort.

Des notions plus subtiles, concernant des paramètres qui influencent le binôme homme/exosquelette, sont soulevées par certains auteurs et viennent éclairer la compréhension de notre sujet. Il apparaît que l'assistance fournie doit faire l'objet d'un choix particulièrement judicieux, pour éviter un mauvais calibrage, qui, à défaut d'apporter l'assistance souhaitée, pourrait entraîner une inversion de fonction délétère pour son porteur. En effet, en sortant du cadre d'un réglage « idéal », ce dispositif perd peu à peu de son efficacité, jusqu'à entraîner, dans une situation extrême, un mésusage de l'outil.

A travers les éléments analysés, nous avons pu remarquer que le niveau d'assistance fourni par l'appareil était directement influencé par l'anthropométrie du sujet, le poids de l'outil et la hauteur de la tâche donnée. Fort de ces constatations, il nous est apparu très nettement que l'EPMS est un outil ergonomique surtout efficace dans le cadre de sa tâche de prédilection que constitue l'« overhead work », et cela avec un réglage adapté de l'assistance délivrée.

Des tendances fortes transparaissent donc à travers l'analyse de la littérature. Cependant, la forte hétérogénéité des études, le nombre réduit de sujets inclus et l'absence de méta-analyse compromettent grandement la signification statistique et l'applicabilité

clinique des résultats. De toute évidence, en l'état actuel des connaissances, il n'existe pas d'étude de qualité suffisamment acceptable pour apporter des preuves scientifiques concrètes. Dans cette situation, aucune conclusion ne peut être formalisée de manière catégorique. Nous ne pouvons qu'extrapoler et émettre des hypothèses dans l'attente d'études ultérieures. A défaut de disposer de véritables études thérapeutiques longitudinales solides, les questionnements concernant les répercussions d'une utilisation sur le long terme, restent en suspens. Ce type d'étude, dans le contexte réel d'une tâche professionnelle quotidienne, permettrait sûrement de conférer le recul nécessaire à la confirmation objective d'une modification de la fatigue musculaire et de la pénibilité du travail.

Il apparaît comme une évidence que la réduction de l'activité musculaire n'est pas suffisante, à elle seule, pour prévenir la survenue de TMS. Si nous souhaitons évaluer de manière méthodique les EPMS, il faudra alors prendre en considération d'autres paramètres, avant de pouvoir recommander ces dispositifs. Ils soulèvent encore des questionnements quant aux adaptations neuromusculaires, aux modifications du contrôle postural et gestuel induits par des altérations de la proprioception et du schéma moteur, à la suite d'une utilisation prolongée de l'EPMS.

D'autres éléments qui n'ont pas été abordés précédemment méritent d'être mis en avant. Il existe d'autres risques à l'utilisation d'un EPMS, parfois insoupçonnés, et qui pourraient être susceptibles de générer de manière indirecte une augmentation de la fatigue, des traumatismes, ou bien de favoriser l'apparition des TMS. Pour exemple, il est probable que l'association entre l'homme et l'Exo puisse finalement se révéler hautement inconfortable et éprouvante, du fait des hautes performances exigées en termes de régularité et de cadence du travail. Dans ce scénario, l'augmentation de productivité des Exos profiterait à l'entreprise, au détriment de la santé des salariés. Pour ce qui est des réponses organisationnelles et psychologiques, il est possible que l'utilisation d'un EPMS puisse être à l'origine d'une intensification de la charge mentale et du stress du travailleur par l'augmentation des exigences en termes de performance (vitesse, qualité, précision).

Par ses connaissances médicales et son approche biomécanique du corps, le Masseur-Kinésithérapeute peut légitimement endosser son rôle d'évaluateur des exosquelettes et de formateur auprès des travailleurs. En entreprise, l'intervention d'un professionnel comme le MK serait souhaitable pour valoriser un bon usage et potentialiser leur efficacité, à travers un apprentissage assidu du bon paramétrage de l'outil.

D'autre part, il semble important que le porteur de l'exosquelette soit guidé à travers sa prise de conscience des répercussions posturales, cinétiques, et sur les synergies musculaires induites, afin d'éviter tout mésusage délétère. Au même titre qu'une prothèse ou qu'une aide technique, leur utilisation doit faire l'objet d'un apprentissage individuel, encadré par un professionnel, dans le respect des principes d'une démarche préventive.

Par leur approche mécanique de l'étude de l'objet, de l'espace, et du mouvement, l'ingénierie et la kinésithérapie sont ici intimement liés. Ces deux domaines montrent beaucoup de similitudes mais gagneraient à associer davantage leurs connaissances et leurs outils, dans l'optique d'une meilleure compréhension des modèles biomécaniques du corps humain et des dispositifs ergonomiques.

7. Bibliographie

- [1] INRS. Dossier - Troubles musculosquelettiques 2019.
- [2] Roquelaure Y. Actualités concernant les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur en relation avec le travail répétitif. Bull Acad Natl Med 2017;201:1149-60. [https://doi.org/10.1016/s0001-4079\(19\)30388-7](https://doi.org/10.1016/s0001-4079(19)30388-7).
- [3] l'Assurance Maladie. Troubles musculosquelettiques (TMS) 2018. <https://www.ameli.fr/assure/sante/themes/tms/comprendre-troubles-musculosquelettiques>.
- [4] Roquelaure Y, Bodin J, Descatha A, Petit A. Troubles musculo-squelettiques liés au travail. Rev Prat 2018;vol.68, n°1, p.84-90. <http://www.camip.info/nous-avons-lu-pour-vous/pathologie-du-travail/maladies-professionnelles-et-a/tms-troubles-musculosquelettiques/article/troubles-musculo-squelettiques>.
- [5] INRS. Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS) Guide pour les préventeurs s. d.
- [6] Steering Committee for the Workshop on Work-Related Musculoskeletal Injuries: The Research Base NRC. Work-related musculoskeletal disorders: report, workshop summary, and workshop papers. vol. 57. 2000. <https://doi.org/10.1136/oem.57.6.431a>.
- [7] Ganster DC, Rosen CC. Work Stress and Employee Health: A Multidisciplinary Review. vol. 39. 2013. <https://doi.org/10.1177/0149206313475815>.
- [8] Herr H. Exoskeletons and orthoses: Classification, design challenges and future directions. J Neuroeng Rehabil 2009;6. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-21>.
- [9] Agarwal P, Deshpande AA. Exoskeletons : State-of-the-Art , Design Challenges , and Future. 2019. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190455132.003.0011>.
- [10] Rodriguez DH, Wang W. Realistic computer aided design Master Degree Project in Virtual Product Realization 2019.
- [11] JARRASSÉ N. Les exosquelettes. Ref TIP661WEB - « Robotique » 2019.
- [12] Theurel J, Claudon L, INRS. Exosquelettes au travail : impact sur la santé et la sécurité des opérateurs, état des connaissances 2018.
- [13] Nussbaum MA, Lowe BD, Looze M De, Harris- C, Smets M, Nussbaum MA. An Introduction to the Special Issue on Occupational Exoskeletons. IISE Trans Occup Ergon Hum Factors 2020;7:153-62. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1709695>.
- [14] Ministère des Armées - République Française. L'exosquelette Héraclès, le futur à nos portes 2011. <https://www.defense.gouv.fr/actualites/economie-et-technologie/l->

exosquelette-hercule-le-futur-a-nos-portes.

- [15] Delaval K, Larroque D, Vaudoux D. Les dispositifs d'assistance physique s. d.
- [16] Spada S, Ghibaud L, Carnazzo C, Pardo M Di, Chander DS, Gastaldi L, et al. Physical and Virtual Assessment of a Passive Exoskeleton. vol. 3. Springer International Publishing; 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96068-5>.
- [17] Herr H. Genoux et chevilles biomécatroniques. Youtube; 2016.
- [18] INRS. Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030 en France 2015.
- [19] Médimex. Fiche technique - Armeo power® s. d.:69110.
- [20] Theurel J, Desbrosses K. Occupational Exoskeletons: Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders. IISE Trans Occup Ergon Hum Factors 2019:1-17. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1638331>.
- [21] Hefferle M, Lechner M, Kluth K, Christian M. Development of a Standardized Ergonomic Assessment Methodology for Exoskeletons Using Both Subjective and Objective Measurement Techniques. Adv. Intell. Syst. Comput., vol. 962, Springer Verlag; 2020, p. 49-59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20467-9_5.
- [22] Spada S, Ghibaud L, Gilotta S, Gastaldi L, Cavatorta MP. Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry. Procedia Manuf 2017;11:1255-62. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.252>.
- [23] Van Engelhoven L, Poon N, Kazerooni H, Ban A, Rempel D, Harris-Adamson C. Evaluation of an adjustable support shoulder exoskeleton on static and dynamic Overhead tasks. Proc. Hum. Factors Ergon. Soc., vol. 2, Human Factors and Ergonomics Society Inc.; 2018, p. 804-8. <https://doi.org/10.1177/1541931218621184>.
- [24] Anatomie 3D Lyon. L'épaule: antepulsion ou élévation antérieure du bras 2012. https://www.youtube.com/watch?v=qAKevV1Je_s.
- [25] INRS. Méthode d'analyse de la charge physique de travail s. d.
- [26] Vézina N, St-Vincent M, Dufour B, St-Jacques Y, Cloutier E. La pratique de la rotation des postes dans une usine d'assemblage automobile. Etude exploratoire. Irsst 2003:175.
- [27] Lowe BD, Shaw PB, Wilson SR, Whitaker JR, Greg J, Hudock SD, et al. Evaluation of a Workplace Exercise Program for Control of Shoulder Disorders in Overhead Assembly Work. J Occup Environ Med 2017;59:563-70. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000001030>.
- [28] Butler T, Gilette JC. Exoskeletons: Used as PPE for Injury Prevention 2019. <https://scholar.google.com/scholar?client=firefox-b-d&um=1&ie=UTF-8&lr&cites=466708349711265489>.

- [29] Podniece Z, Taylor TN. Work-related musculoskeletal disorders: prevention report. vol. EN 4. 2008.
- [30] Stiglitz J. Premiers résultats : sixième enquête européenne sur les conditions de travail 2010:1-8.
- [31] INRS. Évaluation subjective de la charge de travail 2014:105-22.
- [32] Borg G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion 2015. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1815>.
- [33] Borg G. Borg ' s Perceived Exertion And Pain Scales 2016.
- [34] Alabdulkarim S, Nussbaum MA. Influences of different exoskeleton designs and tool mass on physical demands and performance in a simulated overhead drilling task. Appl Ergon 2018;74:55-66. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.004>.
- [35] Gillette JC, Stephenson ML. Electromyographic Assessment of a Shoulder Support Exoskeleton During on-Site Job Tasks. IISE Trans Occup Ergon Hum Factors 2019:1-9. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1665596>.
- [36] Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MI, Alemi MM, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. Appl Ergon 2018;70:315-22. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.024>.
- [37] Van Engelhoven L, Poon N, Kazerooni H, Rempel D, Barr A, Harris-Adamson C. Experimental Evaluation of a Shoulder-Support Exoskeleton for Overhead Work: Influences of Peak Torque Amplitude, Task, and Tool Mass. IISE Trans Occup Ergon Hum Factors 2019:1-14. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1637799>.
- [38] Huysamen K, Bosch T, de Looze M, Stadler KS, Graf E, O’Sullivan LW. Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. Appl Ergon 2018;70:148-55. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>.
- [39] Kim S, Nussbaum MA, Mokhlespour Esfahani MI, Alemi MM, Jia B, Rashedi E. Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part II – “Unexpected” effects on shoulder motion, balance, and spine loading. Appl Ergon 2018;70:323-30. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.024>.
- [40] Kim S, Nussbaum MA, Esfahani MI, Alemi MM, Bochen J, Rashedi E. Assessing the influence of a passive , upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation : Part II – “ Unexpected ” e f f e c t s on shoulder motion , balance , and spine loading. Appl Ergon 2018;70:323-30. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.024>.
- [41] Luque EP, Högberg D, Iriondo A, Thorvald P. Evaluation of the Use of Exoskeletons in the Range of Motion of Workers. 2019.

- [42] Schmalz T, Schändlinger J, Schuler M, Bornmann J, Schirrmeister B, Kannenberg A, et al. Biomechanical and metabolic effectiveness of an industrial exoskeleton for overhead work. *Int J Environ Res Public Health* 2019;16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234792>.
- [43] Fryar CD, Gu Q, Ogden CL. Anthropometric reference data for children and adults: United states, 2007-2010. vol. 11. 2012.
- [44] Daub U. Evaluation aspects of potential influences on human beings by wearing exoskeletal systems Evaluation aspects of potential influences on human beings by wearing exoskeletal systems 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-16988-6>.
- [45] Hérauville T, Meur C Le, Nicolas B, Gallien P. Dispositif de rééducation neuromotrice associée à un exosquelette 2018.
- [46] l'Assurance Maladie. Rapport Annuel 2017 2017.
- [47] Dahmen C, Hefferle M. Application of Ergonomic Assessment Methods on an Exoskeleton Centered Workplace. *Proc XXXth Annu Occup Ergon Saf Conf* 2018:17-25.

8. Annexes

Figure A

Figure A : Les différents facteurs responsables des troubles musculo-squelettiques (Source Ameli)

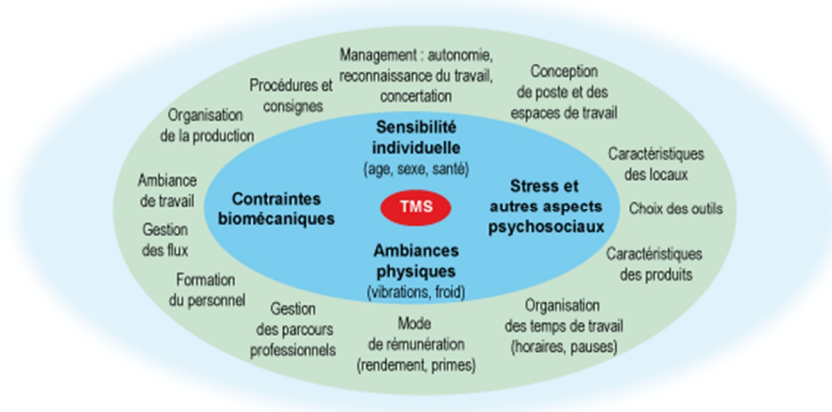


Figure B

Figure B : les trois modèles d'EPMS qui sont observés dans les études incluses à la revue ; a) ShoulderX® de SuitX, b) Airframe® de Levitate Tech, c) EksoVest® de EksoBionics



Figure C

Figure C : Tableau de référence d'un tâche classique d'overhead work sur une chaîne d'assemblage automobile (Source : [47])

Characteristics of the overhead sample workplace:	
duration of shift	9 h
brake times	1.5 h (4x15 min, 1x30 min)
time performing overhead work	3 h 40 min
length of cycle / screws	160 s / 20
time per screw (static work)	5 s
weight of screw driver	1.55 kg
weight of underfloor trim	1.45 kg
body posture angles	Between upper arm and chest: 90° Between forearm and chest: 90°

Figure D

Figure D : Evolution des TMS reconnus au tableau des maladies professionnelles - MP 57, (Source : Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS) guide pour préventeurs, INRS [5])

Tableau 75
Dénombrement des TMS MP 57 par localisation et évolution annuelle

	2013	2014	2015	2016	2017
Épaule	12 444	13 050	13 445	12 948	13 223
	- 8,9 %	4,9 %	3,0 %	- 3,7 %	2,1 %
Coude	9 338	9 289	9 322	9 268	9 407
	2,8 %	- 0,5 %	0,4 %	- 0,6 %	1,5 %
Poignet-main- doigt	18 369	18 166	17 039	16 175	15 634
	- 2,7 %	- 1,1 %	- 6,2 %	- 5,1 %	- 3,3 %
Genou	391	366	361	281	276
	- 10,1 %	- 6,4 %	- 1,4 %	- 22,2 %	- 1,8 %
Pied-cheville	49	45	44	60	36
	2,1 %	- 8,2 %	- 2,2 %	36,4 %	- 40,0 %
Divers	22	20	9	8	4
	- 46,3 %	- 9,1 %	- 55,0 %	- 11,1 %	- 50,0 %

Figure E

Figure E : Les échelles de Borg, RPE, CR10 suivi d'un exemple de Body Map

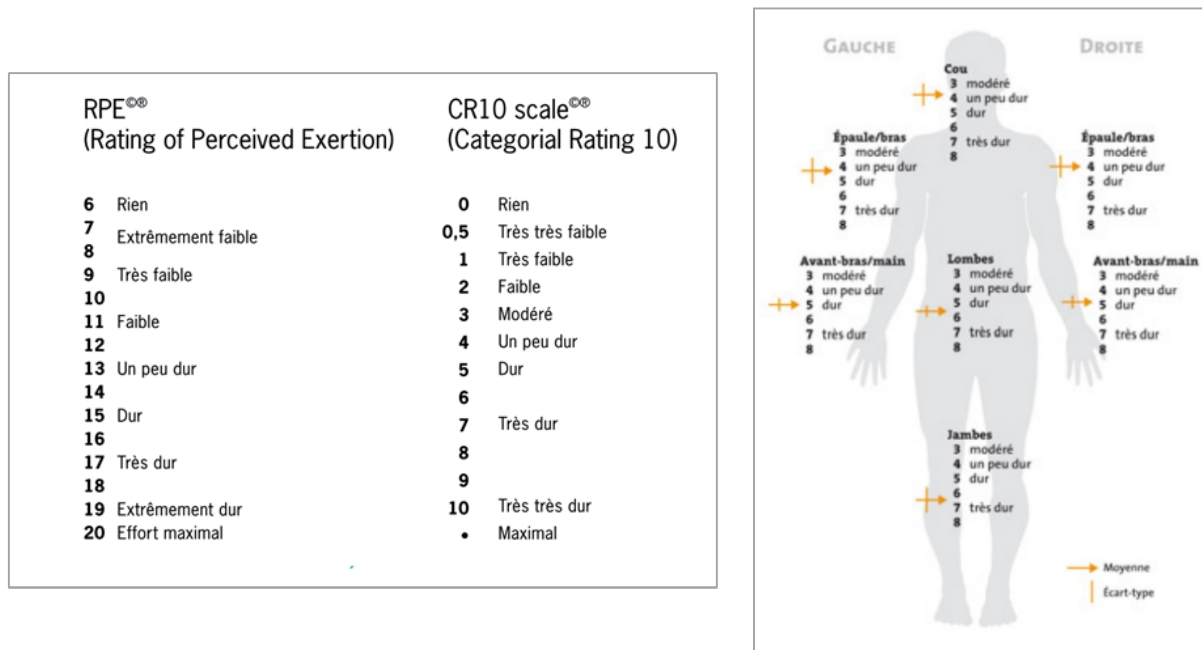


Figure F

Figure F,a : Version originale non détaillée du Risk of Bias in N-of-1 Trials – RoBiNT Scale

Item content of the Risk of Bias in N-of-1 Trials (RoBiNT) Scale*	
Internal validity subscale	External validity and interpretation subscale
<p>1. Design: Does the design of the study meet requirements to demonstrate experimental control?</p> <p>2. Randomisation: Was the phase sequence and/or phase commencement randomised?</p> <p>3. Sampling: Were there a sufficient number of data points (as defined) in each of baseline and intervention phases?</p> <p>4. Blind participants/therapists: Were the participants and therapists blinded to the treatment condition (phase of study)?</p> <p>5. Blind assessors: Were assessors blinded to treatment condition (phase of study)?</p> <p>6. Inter-rater reliability (IRR): Was IRR adequately conducted for the required proportion of data, and did it reach a sufficiently high level (as defined)?</p> <p>7. Treatment adherence: Was the intervention delivered in the way it was planned?</p>	<p>8. Baseline characteristics: Were the participant's relevant demographic and clinical characteristics, as well as characteristics maintaining the condition adequately described?</p> <p>9. Therapeutic setting: Were both the specific environment and general location of the investigation adequately described?</p> <p>10. Dependent variable (target behaviour): Was the target behaviour defined, operationalised, and the method of its measurement adequately described?</p> <p>11. Independent variable (intervention): Was the intervention described in sufficient detail, including the number, duration and periodicity of sessions?</p> <p>12. Raw data record: Were the data from the target behaviour provided for each session?</p> <p>13. Data analysis: Was a method of data analysis applied and rationale provided for its use?</p> <p>14. Replication: Was systematic and/or inter-subject replication incorporated into the design?</p> <p>15. Generalisation: Were generalisation measures taken prior to, during, and at the conclusion of treatment?</p>

Figure F.b : Version détaillée, traduite en français du RoBiNT Scale

Validité interne	/14	Validité externe et interprétation	/16
1) Conception : La conception de l'étude répond-elle aux exigences d'un contrôle expérimental ?	/2	8) Caractéristiques de base : Les caractéristiques démographiques et cliniques pertinentes du participant, ainsi que les caractéristiques sur l'état de santé, ont-elles été correctement décrites ?	/2
2) Randomisation : La séquence des phases et/ou le début des phases étaient-ils randomisés ?	/2	9) Cadre thérapeutique : L'environnement spécifique et le lieu général de l'étude ont-ils été décrits de manière adéquate ?	/2
3) Échantillonnage : Y avait-il un nombre suffisant de données dans chacune des phases de référence et d'intervention ?	/2	10) Variable dépendante (critère de jugement) : Le critère de jugement a-t-il été défini, opérationnalisé, et la méthode de sa mesure a-t-elle été décrite de manière adéquate ? <i>Définition opérationnelle du critère de jugement cible sans décrire ou utiliser de mesure précise et reproductible (score de 1 point), sans préciser ce qui constitue une réponse correcte/incorrecte. Ces trois éléments sont nécessaires pour obtenir 2 points</i>	/2
4) Participants/thérapeutes en aveugles : Les participants et les thérapeutes étaient-ils en aveugle par rapport à l'état du traitement (phase de l'étude) ?	/2	11) Variable indépendante (intervention) : L'intervention a-t-elle été décrite de manière suffisamment détaillée, notamment en ce qui concerne le nombre, la durée et la périodicité des séances ?	/2
5) Évaluateurs en aveugles : Les évaluateurs étaient-ils en aveugle sur l'état du traitement (phase de l'étude) ? <i>De plus en plus, les rapports sur un seul cas font appel à un évaluateur indépendant du thérapeute (score de 1 point), cependant, pour obtenir 2 points, l'évaluateur doit être aveugle à la phase d'intervention</i>	/2	12) Enregistrement de données brutes : Les données du critère de jugement ont-elles été fournies pour chaque session ? <i>enregistrement complet des données brutes au niveau de chaque session (2 points), données incomplètes (1 point).</i>	/2
6) Fiabilité inter-examineur : La fiabilité inter-examineur a-t-elle été réalisée de manière adéquate pour la proportion requise de données, et a-t-elle atteint un niveau suffisamment élevé (tel que défini) ? <i>L'utilisation de données générées par une machine, sans jugement humain, ou de "mesures raisonnablement objectives" reçoivent respectivement 2 et 1 points</i>	/2	13) Analyse des données : Une méthode d'analyse des données a-t-elle été appliquée et une justification a-t-elle été fournie pour son utilisation ? <i>2 points sont attribués si utilisation d'une analyse visuelle systématique ou si l'analyse visuelle est aidée par des techniques quasi-statistiques. Un point est attribué si l'analyse visuelle systématique, assistée est incomplète</i>	/2
7) Adhérence au traitement : L'intervention a-t-elle été réalisée comme prévu ?	/2	14) Répétition : Une répétition systématique et/ou inter-sujets a-t-elle été incorporée dans la conception ? <i>Dans le contexte de ce point, la réplication fait référence à la répétition de l'ensemble de l'expérience, qui peut être une réplication directe entre sujets et/ou systématique. Pour l'attribution de 2 points, au moins trois réplifications sont requises (c'est-à-dire, original + 3 réplifications) ; une ou deux réplifications se voient attribuer 1 point</i>	/2
		15) Généralisation : Des mesures de généralisation ont-elles été prises avant, pendant et à la fin du traitement ? <i>Les mesures de généralisation doivent être évaluées à toutes les phases de l'expérience afin de marquer 2 points. Un niveau de généralisation accepté qui obtiendrait 1 point consisterait à évaluer les mesures de généralisation avant et pendant la conclusion du traitement</i>	/2

Figure G

Figure G : Données brutes complémentaires de l'étude de Gillette (2019) partagées par ce dernier

Tableau de l'activité moyenne générale des différents muscles, dans toutes les conditions d'enregistrements, avec et sans EPMS (en % de la MVC)

Job 1 - Assemblage Ailes					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
		(%MVC)	(%MVC)	(%MVC)	(%MVC)
Without	Avg	15.3	8.9	13.5	8.8
Exoskeleton	Avg	17.5	9.3	12.0	8.4
Job 2 - Soudure					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
Without	Avg	11.5	9.9	10.6	7.9
Exoskeleton	Avg	9.8	9.5	11.6	10.0
Job 3 - Assemblage voiture					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
Without	Avg	26.6	9.2	15.4	15.8
Exoskeleton	Avg	17.5	7.9	15.4	14.1
Job 4 - Assemblage hydraulique					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
Without	Avg	22.0	16.0	17.0	17.9
Exoskeleton	Avg	14.9	11.8	11.2	15.5
Job 5 - Suspension					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
Without	Avg	15.2	19.8	11.3	18.7
Exoskeleton	Avg	12.7	18.8	11.1	13.7
Job 6 - Peinture					
Condition		Deltoid	Biceps	Trapezius	Spinae
Without	Avg	26.0	10.8	19.6	10.6
Exoskeleton	Avg	22.3	9.9	16.9	8.9

Figure H

Figure H : Graphiques tirés de l'étude de Van Engelhoven (2019) (avec accord de l'auteur)
 Activité des différents muscles (% MVC) en fonction du niveau d'assistance PTA apporté par l'EPMS (Nm)

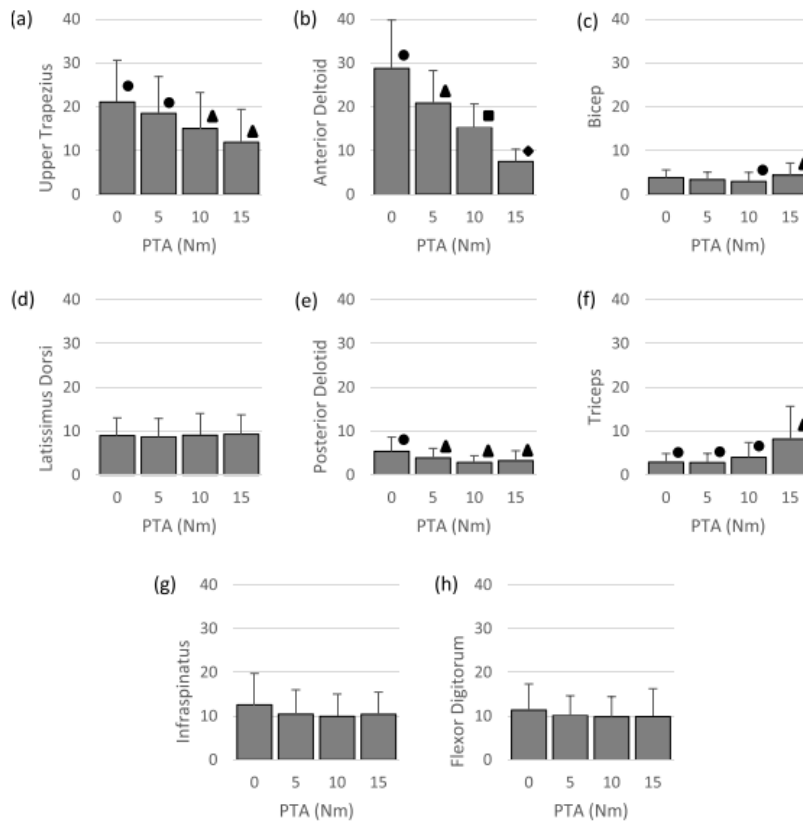
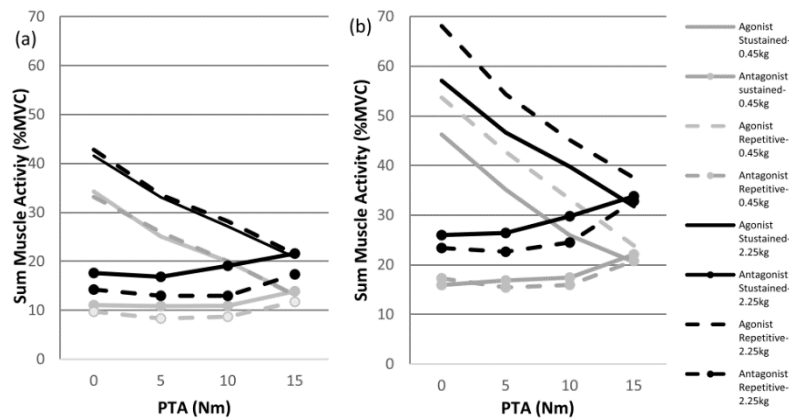


Figure I

Figure I : Courbes tirées de l'étude de Van Engelhoven (2019) (avec accord de l'auteur)
 Activité (% MVC) du groupe agoniste (Trapèze supérieur, Deltoïde antérieur et Biceps) et antagoniste (Grand dorsal, Deltoïde postérieur, Triceps) en fonction du niveau d'assistance PTA apporté par l'EPMS (Nm), dans les conditions de perçage lourd et léger



Abstract

Introduction : Un nouveau dispositif mécanique a vu le jour, visant à réduire la fatigue musculaire, la pénibilité du travail, et ainsi diminuer l'apparition des troubles musculo-squelettiques chez les ouvriers travaillant de manière prolongée ou répétée, les bras en élévation, principalement dans un environnement industriel. Ces appareils sont les exosquelettes passifs du membre supérieur (EPMS).

Objectif : Cette revue cherche à évaluer objectivement l'efficacité des EPMS en évaluant leur impact sur la fatigue et la pénibilité. Cette vérification passera par la confirmation que l'EPMS assiste bien le sujet (en observant les mesures d'EMG des muscles assistés) sans toutefois qu'il n'y ait de transferts de contraintes vers une autre zone (mesures d'EMG des muscles antagonistes et ceux en périphérie de l'épaule). Les variations dans la perception de la pénibilité seront aussi observées grâce aux échelles de Borg (RDP).

Méthodologie : Entre octobre 2019 et mars 2020, plusieurs bases de données (PubMed, Pedro, Cochrane, Kinédoc et Google Scholar) ont été investiguées conduisant à l'inclusion de quatre études. Les critères d'inclusion ont été élargis car les EPMS constituent un sujet nouveau, étudié par encore très peu d'études.

Résultats et analyses : Les études incluses se sont accordées en faveur d'une diminution d'activité des muscles agonistes de l'élévation d'épaule. Certaines ont observé une augmentation des muscles antagonistes. Les mesures subjectives (Borg), peu significatives et contradictoires n'ont pas montré d'intérêt clinique. Des paramètres importants influencent les résultats comme l'anthropométrie, le poids de l'outil et la hauteur de tâche.

Discussion : Face à l'hétérogénéité et le manque de fiabilité statistique des études, les résultats observés ont fait l'objet d'extrapolations et de théories, à défaut de tirer des conclusions formelles.

Introduction : A new mechanical device has been developed to reduce muscular fatigue, the arduousness of work, and thus reduce the appearance of musculoskeletal disorders in workers working for a long time or repeatedly with their arms raised, mainly in an industrial environment: the upper limb passive exoskeleton (EPMS).

Objective : This review seeks to objectively evaluate the effectiveness of EPMS, by assessing their impact on fatigue and Exoskeleton

Efficiency

Muscle fatigue. This will be done by confirming that the EPMS assists correctly the subject (by observing the EMG measurements of the assisted muscles) without, however, any transfer of stress to another area (EMG measurements of the antagonistic muscles and those in the periphery of the shoulder). Variations in the perception of arduousness will also be observed, using the Borg scales (RDP).

Methodology : Between October 2019 and March 2020, several databases (PubMed, Pedro, Cochrane, Kinédoc and Google Scholar) were investigated leading to the inclusion of four studies. The criteria for inclusion were broadened because EPMS is a new subject, studied by yet few studies.

Results and analyses : The included studies agreed in favour of a decrease in the activity of shoulder elevation agonist muscles. Some observed an increase in antagonist muscles. Subjective measures (Borg) were insignificant, contradictory and did not show any clinical interest. Important parameters influence the results such as anthropometry, tool weight and task height.

Discussion : In view of the heterogeneity and lack of statistical reliability of the studies, the observed results have been subject to extrapolation and theories, failing to draw formal conclusions.

Exosquelette

Exoskeleton

Efficacité

Efficiency

Fatigue musculaire

Muscle fatigue

Pénibilité

Arduousness