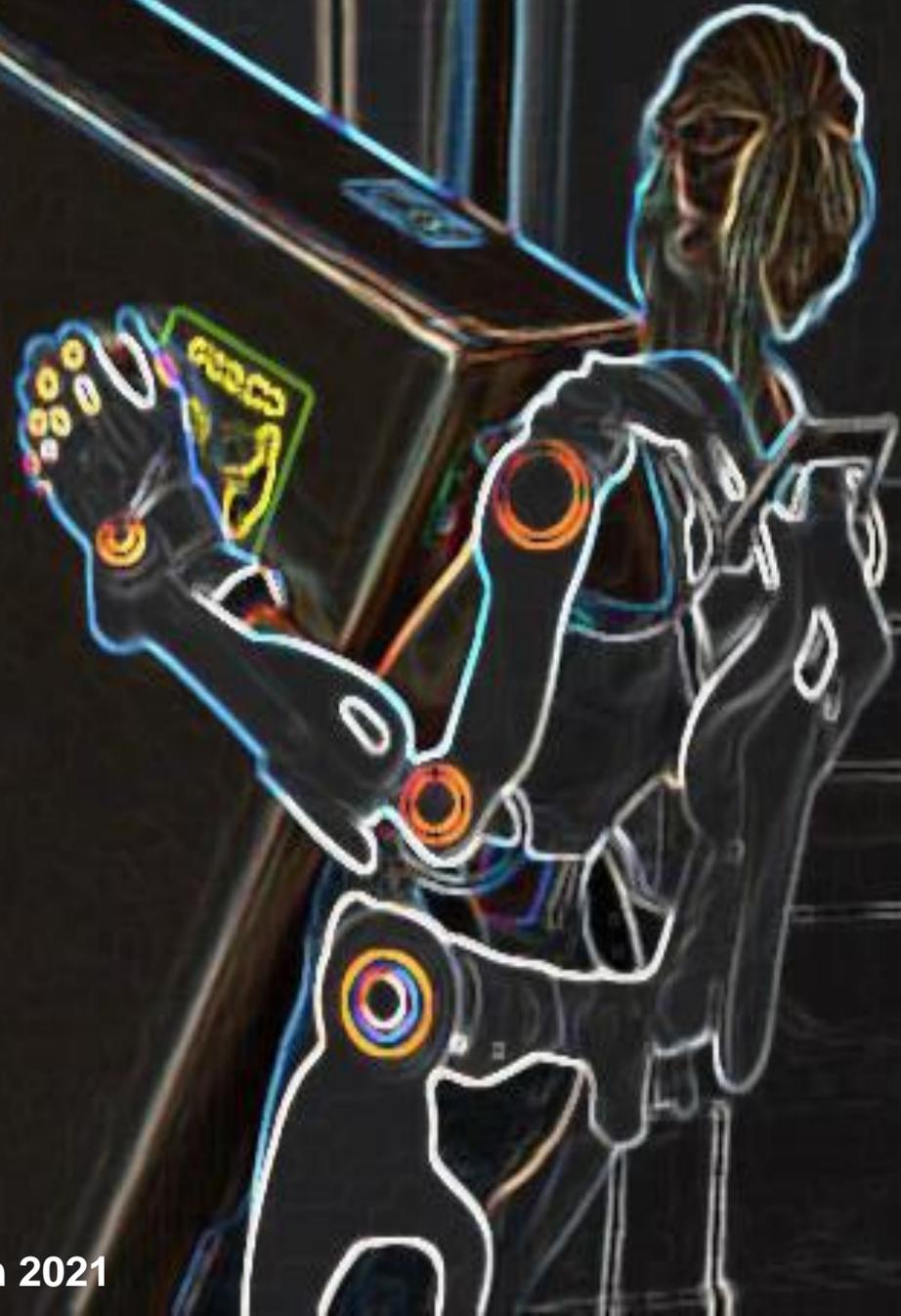


Exosquelettes : solution ou mirage pour la prévention des troubles musculosquelettiques?

Denys Denis Ph. D.
Professeur, ergonomiste



15 juin 2021



Déclaration de conflits d'intérêts



**Denys Denis déclare n'avoir
aucun conflit d'intérêts ou biais
commercial en lien avec cette
présentation.**

15 juin 2021



Plan de la présentation



Qu'est-ce qu'un exosquelette ?

Qu'est-ce qu'on sait des exosquelettes ?

Qu'est-ce qu'on ignore des exosquelettes ?

Les exosquelettes, solution ou mirage pour prévenir les TMS ?

Mise en contexte

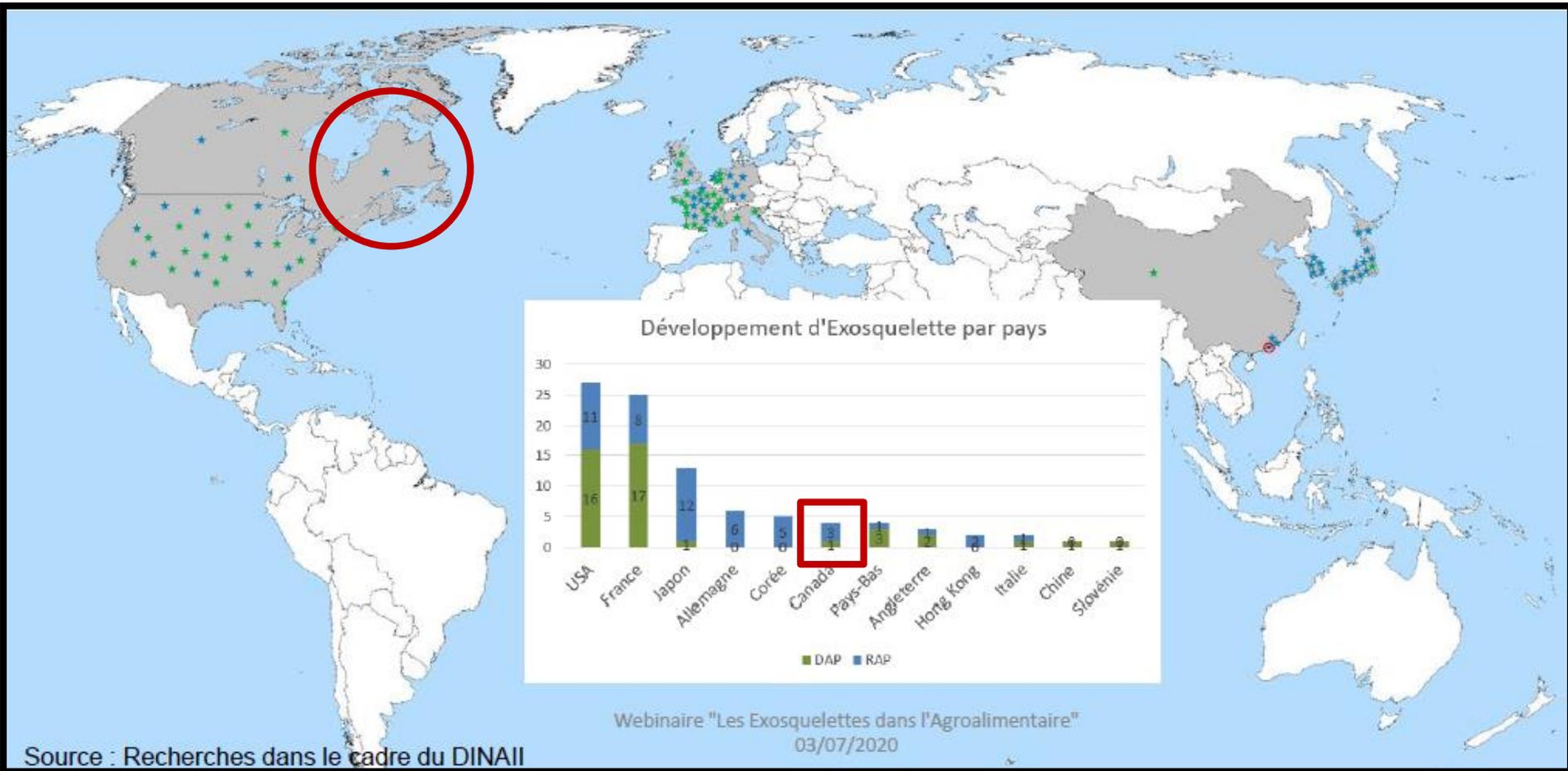


Au Québec, nous en sommes aux premiers cas d'implantation d'exosquelettes en milieu de travail : peu d'expertise disponible

Cependant, de plus en plus d'intérêt manifesté et de volonté de les utiliser : momentum favorable

Peu de chercheurs s'y intéressent dans un contexte de prévention des TMS : peu de données « locales », bien que le pool de connaissances progresse très rapidement

Développement d'exosquelettes dans le monde



Mise en contexte



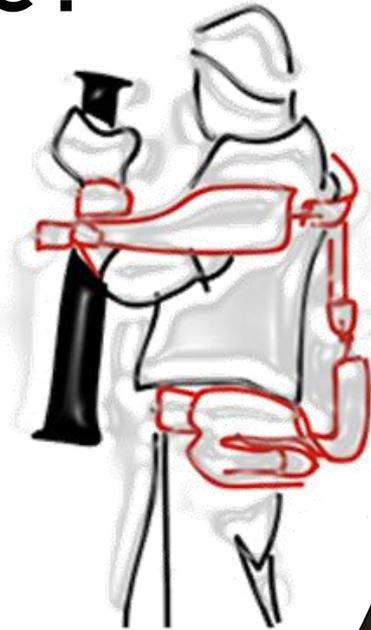
Au Québec, nous en sommes aux premiers cas d'implantation d'exosquelettes en milieu de travail : peu d'expertise disponible

Cependant, de plus en plus d'intérêt manifesté et de volonté de les utiliser : momentum favorable

Peu de chercheurs s'y intéressent dans un contexte de prévention des TMS : peu de données « locales », bien que le pool de connaissances progresse très rapidement

L'intention ici est de donner un portrait des écrits scientifiques, mais aussi des retours d'expérience de cas d'implantation

Qu'est-ce qu'un
exosquelette ?



15 juin 2021

Définition d'un exosquelette

« An exoskeleton can be defined as a wearable, external mechanical structure that enhances the power of a person. »

De Looze et coll. (2016)

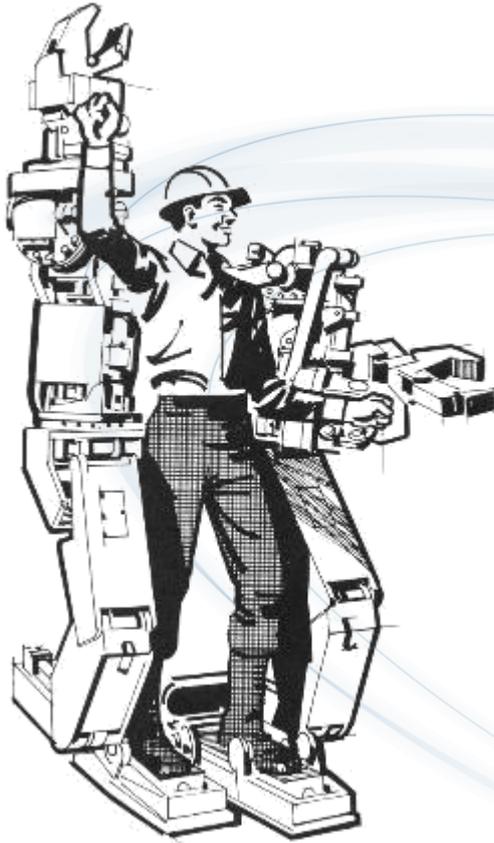
« Un exosquelette est un système mécanique ou textile revêtu par le salarié et visant à lui apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par une compensation de ses efforts et/ou une augmentation de ses capacités motrices (augmentation de la force, assistance des mouvements, etc.). »

Theurel et coll. (2018)

Développement des exosquelettes



Hardiman



*General Electric
Company, 1971*

Développement des exosquelettes



Hardiman

Dabord dans le secteur militaire



*General Electric
Company, 1971*



L'EXOSQUELETTE UPRISE^{MD} DE MAWASHI À L'HONNEUR
LORS DU DÉFILÉ MILITAIRE DU 14 JUILLET 2019 À PARIS

Développement des exosquelettes



Hardiman

Ensuite dans le milieu de la santé



*General Electric
Company, 1971*

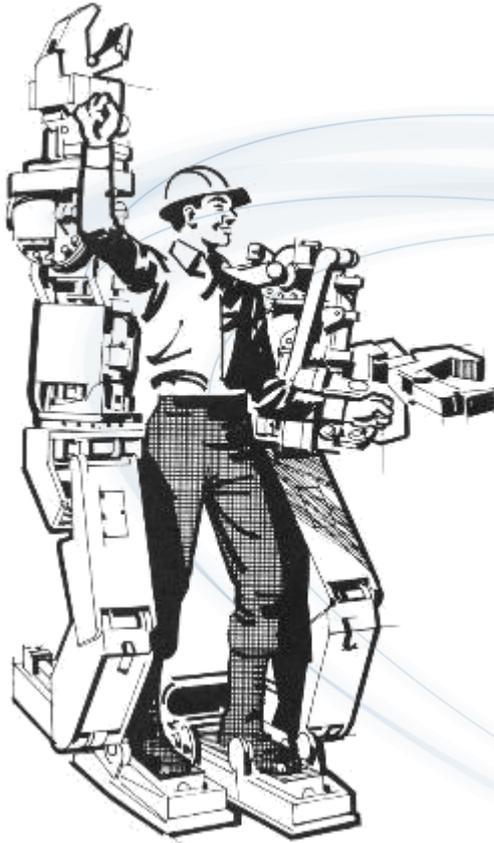


Développement des exosquelettes



Hardiman

Enfin dans le monde du travail



*General Electric
Company, 1971*



Classification des exosquelettes selon ...



... La partie du corps supportée : haut vs bas du corps, dos, corps entier



Dos

Membre sup.



Membre inf.

Classification des exosquelettes selon ...



... La partie du corps supportée : haut vs bas du corps, dos, corps entier

... La source d'énergie utilisée : passive ou active

Exosquelettes passif vs actif



Élastique



Moteur



*Exemples d'exosquelettes passif (gauche) et actif (droit), adaptés à la manutention manuelle
(Source: INRS)*

Classification des exosquelettes selon ...



... La partie du corps supportée : haut vs bas du corps, dos, corps entier

... La source d'énergie utilisée : passive ou active

... L'utilisation visée : réadaptation (soins), palier des incapacités (marche) et augmenter les capacités et la performance (travail)

... Leur ressemblance / adéquation avec la morphologie humaine

Des tonnes de modèles !

<https://exoskeletonreport.com/>



ASTM ET CoE Survey of Exoskeleton Producers

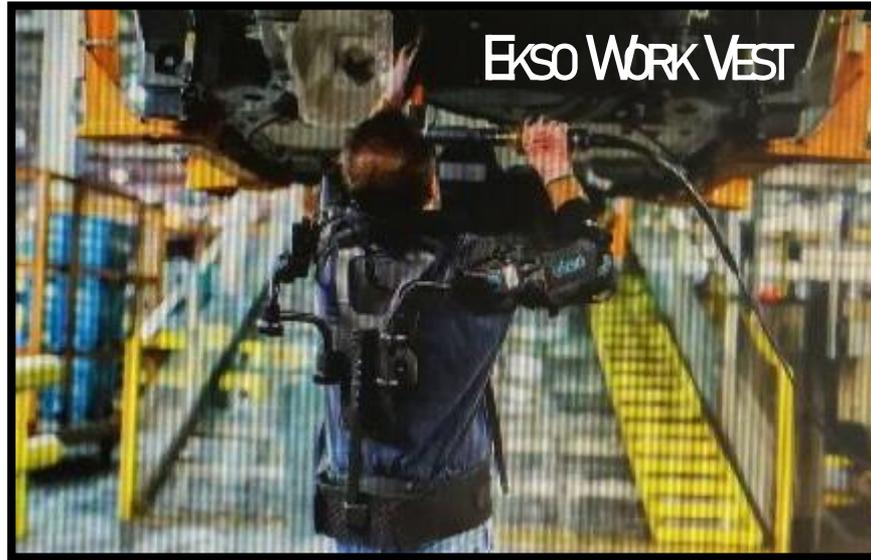


Modèle Laevo : différentes grandeurs (vs réglages)



Size	Body Length in meters
Xsmall	Between 1,56 and 1,63
Small	Between 1,64 and 1,71
Medium	Between 1,72 and 1,79
Large	Between 1,80 and 1,87
Extra Large	Between 1,88 and 1,95
XXlarge	Between 1,96 and 2.03

D'autres modèles génériques



15 juin 2021

Des modèles plus spécifiques à la tâche



Coût approximatif d'un exosquelette



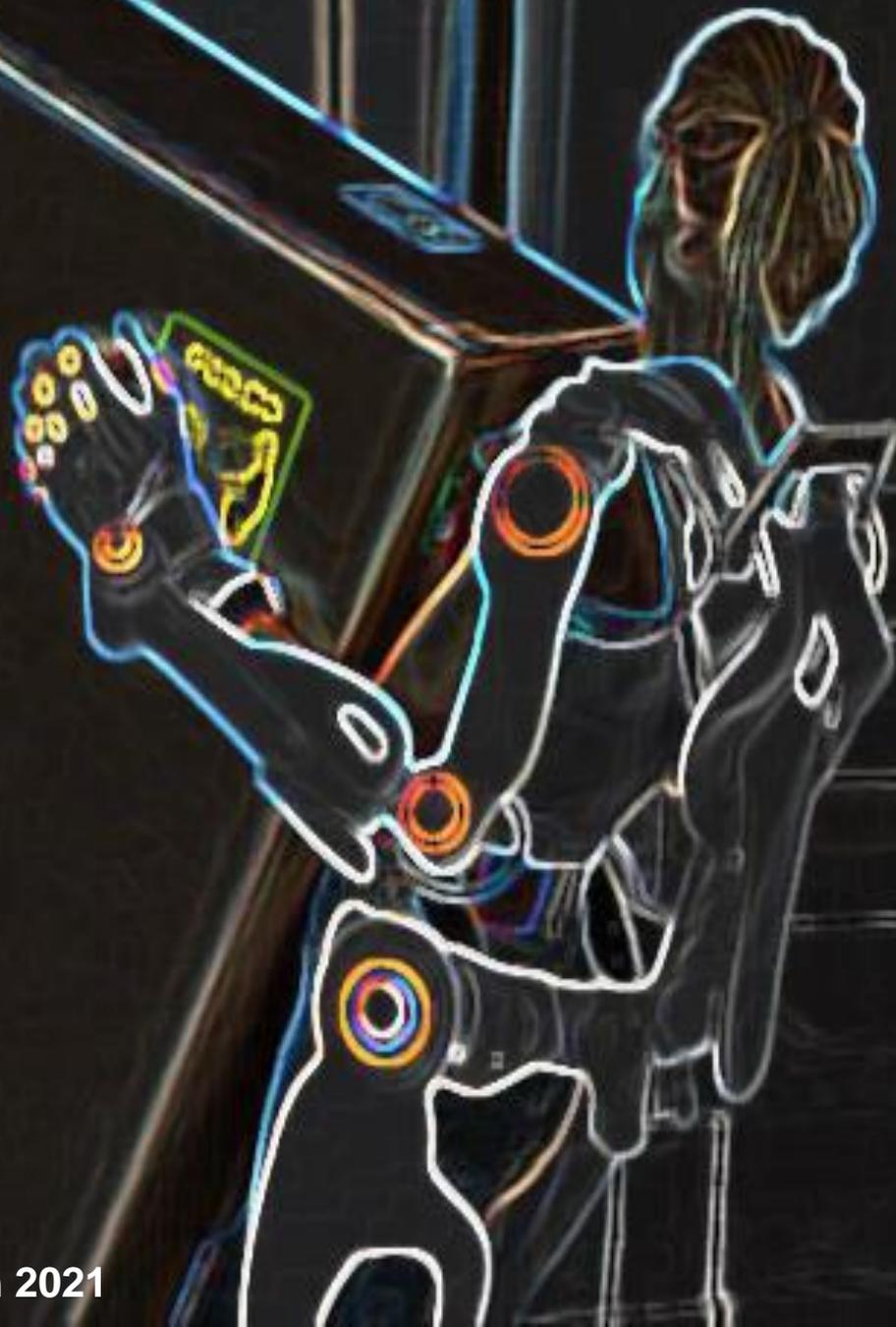
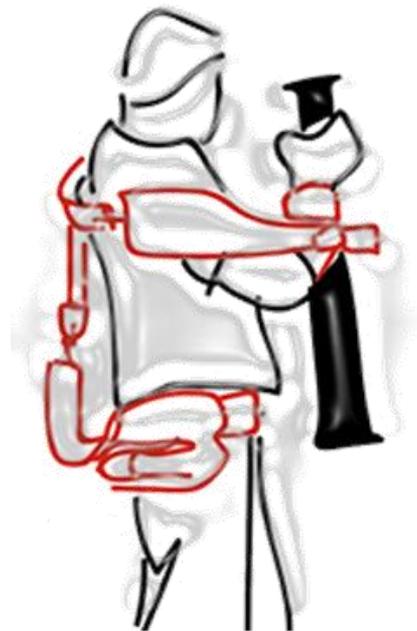
*Entre 5 et
10 000 \$*



> 30 000 \$

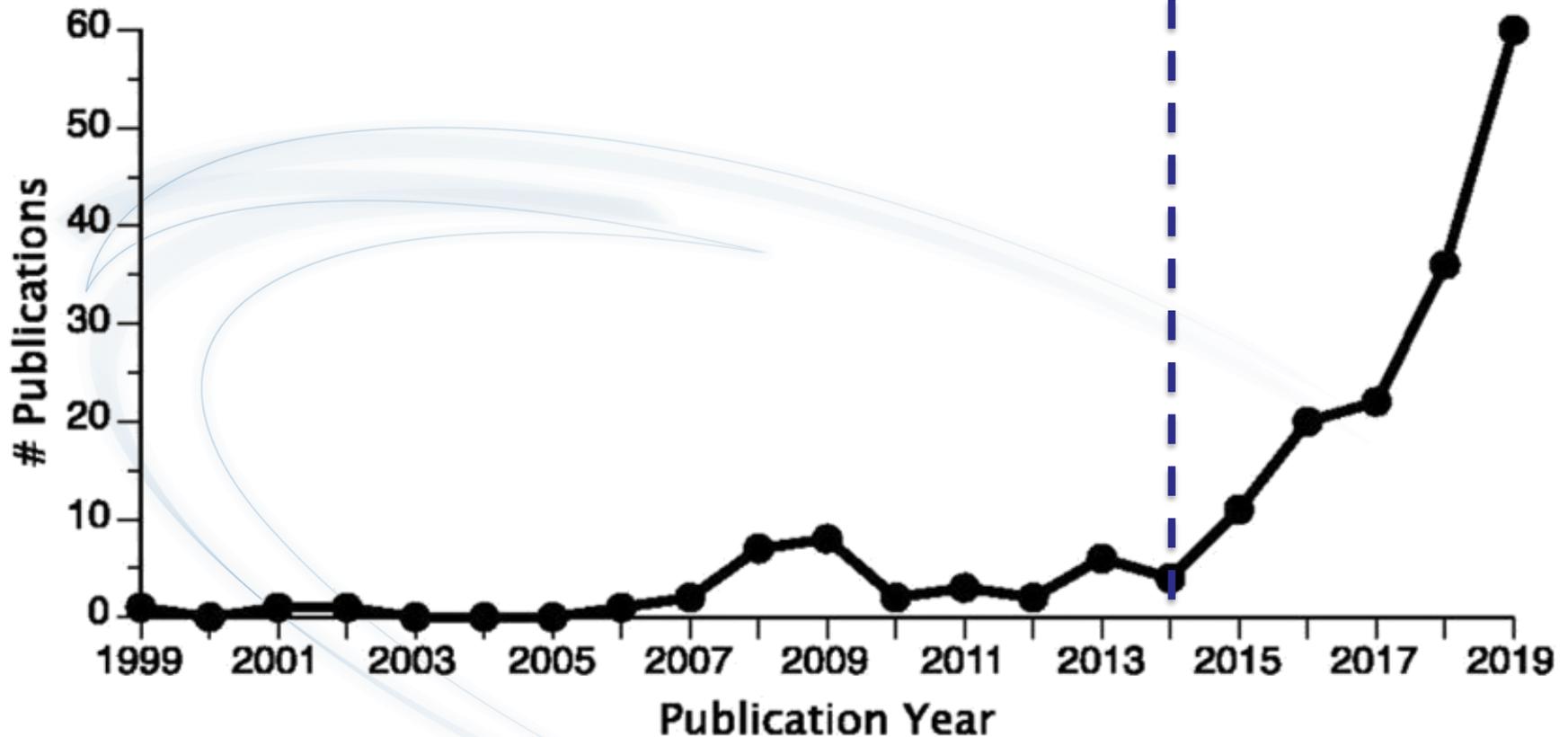
Durée de vie d'un exosquelette ?

Qu'est-ce qu'on sait des exosquelettes?



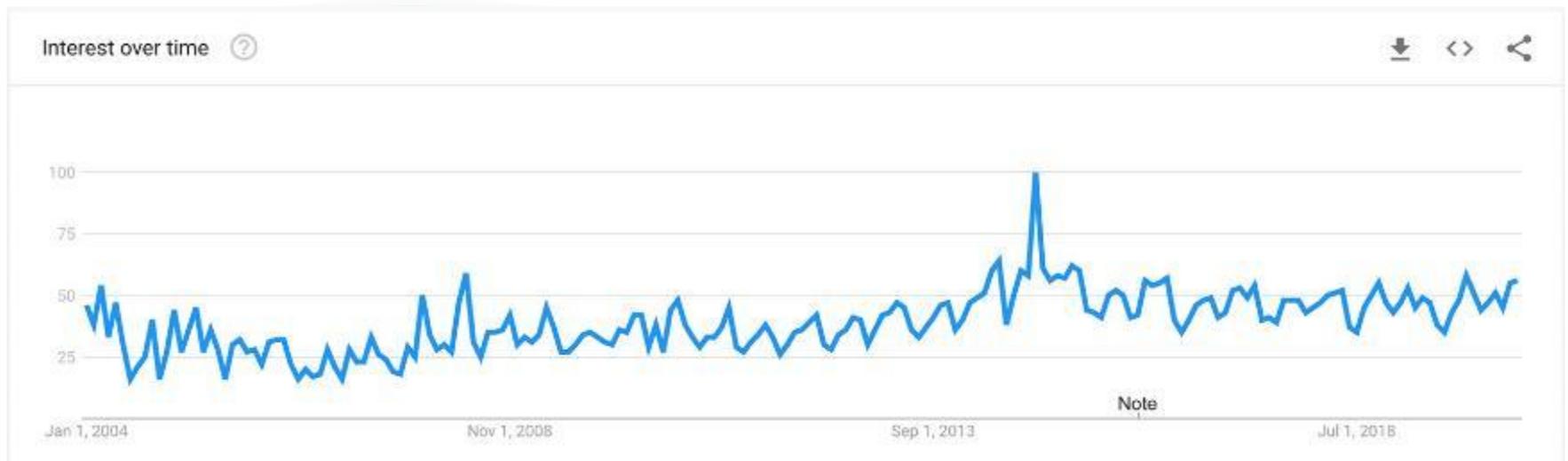
15 juin 2021

Accélération des études sur les exosquelettes



Quid des recherches sur Google vers 2016 !

Intérêt grandissant du public vers 2016, avec un maintien de la tendance depuis



Prévisions des ventes d'exosquelettes

Based on ABI Research's latest *Commercial and Industrial Robotics* market data ([MD-CIROBO-105](#)), the exoskeleton market is valued at **US\$392 million in 2020 and will grow to US\$6.8 billion in global revenue in 2030**. This represents significant growth, but is a contraction from previous studies, which were more optimistic about the fledgling technology. Although exoskeletons are being deployed in a greater variety of roles, they have not proven their worth to the degree that other nascent robotic technologies like Collaborative Robots (cobots) and autonomous navigation systems have.

<https://www.abiresearch.com/market-research/product/7778603-exoskeletons-in-2020-a-technology-still-fi/>

Niveau d'assistance : exosquelette SUTX

SHOULDERX



5 plages de soutien, chacun
comptant 5 niveaux de tension

BACKX



Plages d'angle de soutien
ajustables, 2 niveaux de tension

Inspiré de : Aubert-Simard, stage en ergonomie, 2021



Niveau d'assistance : impact sur le travail

Hauteur de travail et anthropométrie : ajustements distincts



Lisse 5



Lisse 4



Lisse 0

Inspiré de : Aubert-Simard, stage en ergonomie, 2021

Niveau d'assistance des exosquelettes au dos

Torque en extension au niveau lombaire (EXO passifs)

Référence: Torque maximal levée de charge > 200 Nm

Laevo V2.5

~ 20 Nm



Koopman et al. (2020)

SPEXOR

~ 50 Nm



Babic et al (2019)
Baltrusch et al. (2019)

VT-Lowe

~ 70 Nm



Chang et al. (2021)

Effets des exosquelettes à court terme

Effets potentiels annoncés: mais pas toujours démontrés ...

- Diminution des risques de blessures, des risques de développement de TMS, des efforts perçus et des inconforts ressentis
- Amélioration de la performance, de l'efficacité et de la réduction de l'activité musculaire

Effet clairement démontré:

- Diminution de l'activité musculaire de certains muscles, pouvant aller jusqu'à 80 % lors de l'utilisation d'exosquelettes actifs en laboratoire (de Looze et coll., 2016)

Effets des exosquelettes à court terme

Effets négatifs:

- Temps de latence : délai entre la commande et la réponse (EXO actifs)
- Augmentation de la dépense énergétique : surtout à la marche
- Problème de design : poids, autonomie des batteries, points de contact
- Augmentation des efforts musculaires des extenseurs du dos avec un exosquelette des membres supérieurs (Weston et coll., 2018)

Point de vigilance : possibles phénomènes de transfert des charges sur d'autres structures musculaires et articulaires lors de l'utilisation de certains exosquelettes

Mesures des effets : limites des conditions

Les mesures des effets s'effectuent :

- En laboratoire : milieu contrôlé qui mène souvent à une simplification de la tâche analysée (sa variabilité en l'occurrence). Pas de mesures en situations réelles
- À court terme : durée des essais souvent inférieure à 30 min. Or, des observations empiriques montrent qu'une période de 2 heures serait plus adéquate
- Avec des sujets étudiants : les populations étudiées ne sont possiblement pas représentatives des travailleurs

Point de vigilance : prudence dans l'interprétation des données sur les effets. S'assurer de comprendre les conditions dans lesquelles s'effectuent les mesures.

Mesures des effets : étude de Baltrush et coll. (2018)

Évaluation d'un exosquelette passif

Mesures « chiffrées » de la performance (p. ex. durée de maintien d'une posture, distance parcourue, poids maximum soulevé) pour 10 tâches

Recueil des perceptions (inconforts général et local, difficulté perçue) pour 12 tâches

Table 1

Functional performance tests and their respective procedure and outcome measures.

Test	Procedure	Objective outcome measure	Subjective outcome measures		
			GD	LD	PTD
1. Lower lifting	 4-6 lifts from floor level, weight is added to the box (2.5, 3, 5, 7.5 or 10 kg). Start weight is 5 kg and maximum = 23 kg. Increasing the weight depends on coordination and participant's perception.	Max weight lifted (kg)	x		x
2. Carrying	 Carrying the max. weight determined in the lower lifting test in a box for 10 m. Time recording stopped when the participant passed the 10-m mark.	Performance time (s)	x		x
3. Forward bending	 Standing with flexed trunk between 30 and 60°. Performing a simple manual task on a table at knee height, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x	x	x
4. One-handed bank position	 Holding bank position with one hand on the floor. Performing a simple manual task on the floor, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x	x	x
5. 6 Minutes Walk Test	 Walking as far as possible in 6 min.	Distance (m)	x		x
6. Sit to stand	 Sitting down on a chair and getting up 5 times. Participant started in sitting position and time recording stopped when participant sat down the 5th time.	Performance time (s)	x		x
7. Stair Climbing	 Climbing up- and downstairs as fast as possible for 20 steps. No use of handrails. Time recording stopped when both feet were on the floor again.	Performance time (s)	x		x
8. Ladder Climbing	 Climbing up and down a ladder twice. Time recording stopped when both feet were on the floor again.	Performance time (s)	x		x
9. Bending the trunk	 Bending forward as much as possible, knees extended.	Distance fingertip to floor (cm)	x		x
10. Wide Stance	 Standing with feet 20 cm apart, gradually increasing distance by 20 cm.	Maximal distance (cm)	x		x
11. Rotation of the trunk	 Rotating the trunk 5 times to both side.	None	x		x
12. Squatting	 Squatting down to the floor 3 times, touching the floor with the fingers.	None	x		x

GD: General discomfort; LD: Local Discomfort; PTD: Perceived Task Difficulty.

Table 1

Functional performance tests and their respective procedure and outcome measures.

Principaux résultats :

	Procedure	Objective outcome measure	Subjective outcome measures		
			GD	LD	PTD
1. Lower lifting	4-6 lifts from floor level, weight added to the box (2.5, 3.5, 7.5 or 10 kg). Start with 2.5 kg weight lifted (kg). Participant's perception.	Weight lifted (kg)	x		x
2. Carrying	Carrying the max. weight determined in the lower lifting test in a box for 10 m.	Performance time (s)	x		x
3. Forward bending	Standing with flexed trunk between 30 and 60°. Performing a simple manual task on a table at knee height, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x	x	x
4. One-handed bank position	Holding bank position with one hand on the floor. Performing a simple manual task on the floor, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x	x	x
5. 6 Minute Walk Test	Walking as fast as possible for 6 min.	Distance (m)			
6. Sit to stand	Sitting down on a chair and getting up 5 times. Participant started in sitting position and time recording stopped when participant sat down the 5th time.	Performance time (s)	x		x
7. Stair Climbing	Climbing up- and downstairs as fast as possible for 20 steps. No use of handrails. Time recording stopped when both feet were on the floor.	Performance time (s)	x		x
8. Ladder Climbing	Climbing up and down a ladder twice. Time recording stopped when both feet were on the floor.	Performance time (s)	x		x
9. Bending the trunk	Bending forward as much as possible, knees extended.	Distance fingertip to floor (cm)	x		x
10. Wide stance	Standing with feet apart, arms extended forward, trunk flexed 30°. Performing a simple manual task on a table at knee height, max 5 min.	Maximal holding time (s)			x
11. Rotation of the trunk	Rotating the trunk to both sides.	Distance (cm)			x
12. Squatting	Squatting as deep as possible for 10 s.	Performance time (s)			x

■ La performance a diminuée pour 7 des 10 tâches mesurées

■ La difficulté perçue a augmentée pour 10 des 12 tâches évaluées

évaluées

■ L'inconfort général est le plus élevé pour la flexion avant du

tronc

■ Les participants rapportent des inconforts surtout à la poitrine,

aux cuisses et aux hanches (points de contact)

■ Une seule tâche - le travail en posture penchée simulant une

tâche d'assemblage sur une table - montre une tendance vers

l'amélioration de la performance et la réduction de la difficulté

Table 1

Functional performance tests and their respective procedure and outcome measures.

Test	Procedure	Objective outcome measure	Subjective outcome measures		
			GD	LD	PTD
1. Lower lifting	4-6 lifts from floor level, weight is added to the box (2.5, 3, 5, 7.5 or 10 kg). Start weight is kept constant and the weight is increased in 2.5 kg increments until the participant perceives discomfort.	Max weight lifted (kg)	x		x
2. Carrying	Carrying the max. weight determined in the lower lifting test in a box for 10 m. Time recording stopped when the participant passed the 10-m mark.	Performance time (s)	x		x
3. Bending	Standing with feet together, trunk is flexed at 60°. Performing a simple manual task on a table at knee height, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x		x
4. One-handed bank position	Holding bank position with one hand on the floor. Performing a simple manual task on the floor, max 5 min.	Maximal holding time (s)	x	x	x
6. Sit to stand	Sitting down on a chair and getting up 5 times. Participant started in sitting position and time recording stopped when participant sat down the 5th time.	Performance time (s)	x		x
7. Stair climbing	Climbing up and down a ladder twice. Time recording stopped when both feet were on the floor again.	Performance time (s)	x		x
8. Ladder Climbing	Climbing up and down a ladder twice. Time recording stopped when both feet were on the floor again.	Performance time (s)	x		x
9. Forward Stance	Standing with feet 20 cm apart, gradually increasing distance by 20 cm.	Maximal distance (cm)	x		x
10. Wide Stance	Standing with feet 20 cm apart, gradually increasing distance by 20 cm.	Maximal distance (cm)	x		x
11. Forward Trunk	Standing with feet 20 cm apart, gradually increasing distance by 20 cm.	Maximal distance (cm)	x		x
12. Squatting	Squatting down to the floor 3 times, touching the floor with the fingers.	None	x		x

Exosquelette au travail : 6 points de vigilance

Les exosquelettes peuvent soulager les opérateurs mais... leur usage n'est pas sans risque.

Les frottements et les pressions répétés de l'exosquelette sur certaines parties du corps peuvent être à l'origine d'**INCONFORT ET/OU D'IRRITATIONS DE LA PEAU**.



Certaines activités réalisées à l'aide d'exosquelettes exigent une attention accrue qui peut s'accompagner d'une **AUGMENTATION DU STRESS**.



Le poids des exosquelettes et la gêne associée lors de la réalisation de certains mouvements peuvent conduire à une **AUGMENTATION DES SOLlicitATIONS CARDIOVASCULAIRES**.



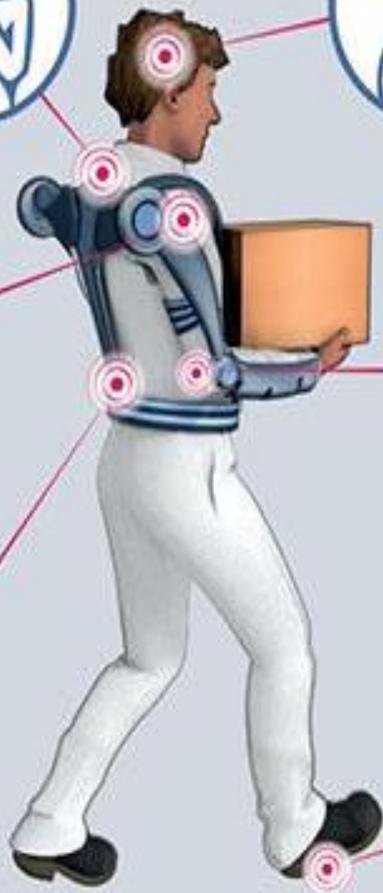
Les exosquelettes, de par leur encombrement et leur structure, présentent des **RISQUES DE COLLISION** avec une tierce personne ou des éléments de l'environnement.

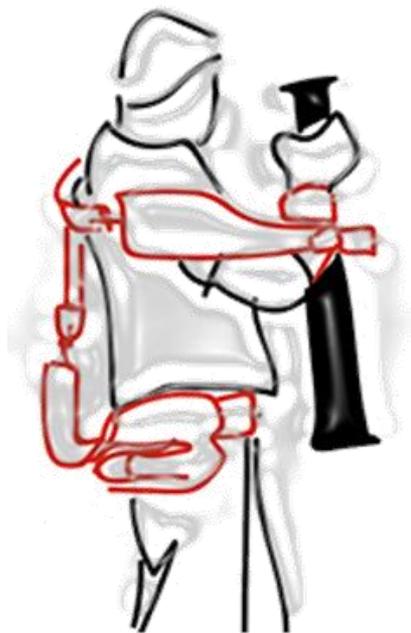


L'usage des exosquelettes modifie la répartition des efforts et peut ainsi contribuer à l'apparition de **NOUVELLES CONTRAINTES BIOMÉCANIQUES**, facteurs de risque de troubles musculosquelettiques (TMS).



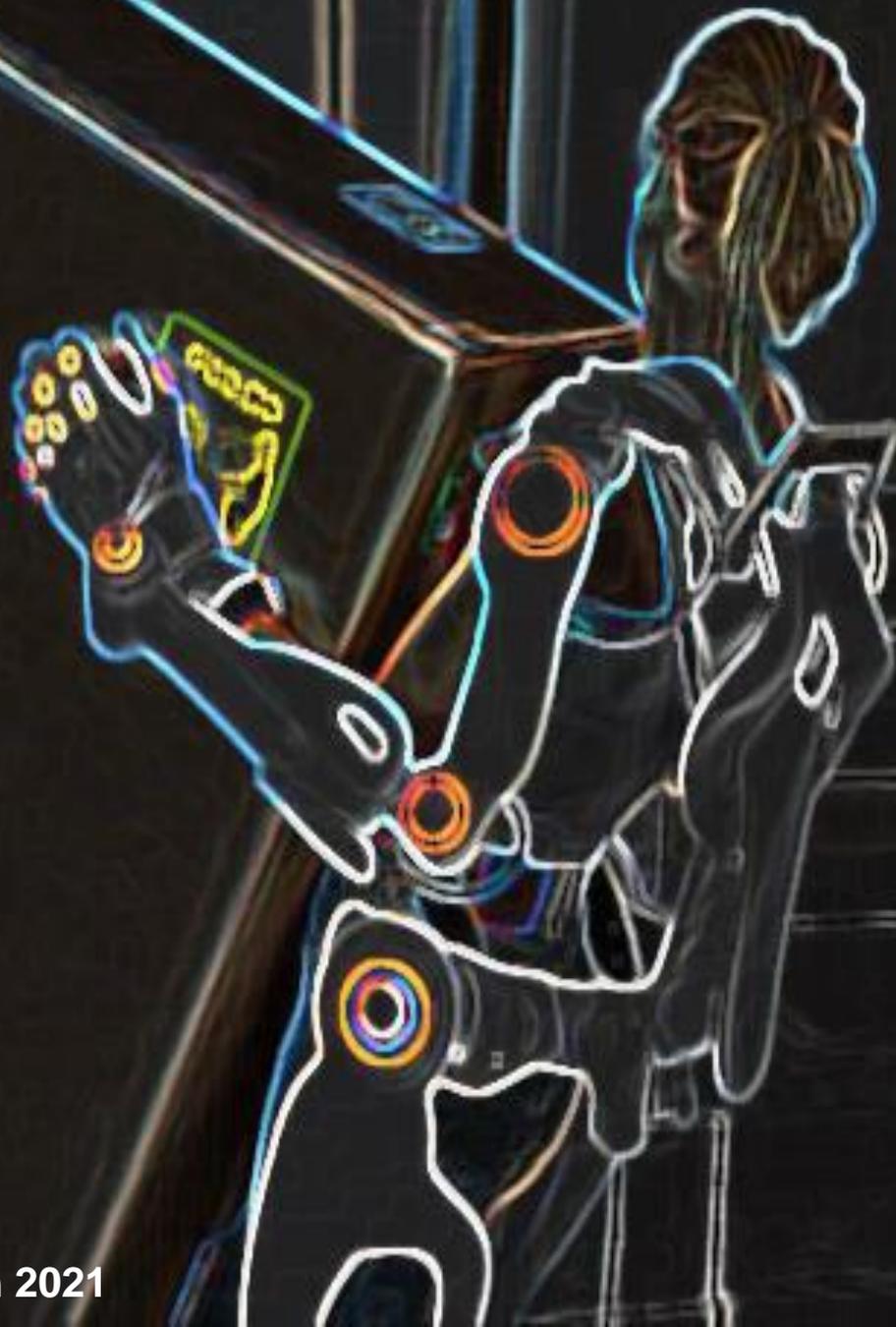
Les exosquelettes sont susceptibles de modifier la perception des efforts et d'entraver les gestes, ce qui peut se traduire par un **DÉSÉQUILIBRE ET/OU DES MOUVEMENTS INCONTRÔLÉS**.





**Qu'est-ce qu'on ignore
des exosquelettes?**

15 juin 2021



Des questions encore en suspens



Le port d'un exosquelette peut-il modifier la gestuelle ?

- Des observations empiriques suggèrent, pour une tâche de manutention, une interférence avec la bascule du bassin
- La fréquence de certaines opérations utiles à la prise d'informations sur l'effort à anticiper (pré manoeuvres) diminueraient : diminution de la perception de l'effort ?



Des études sont requises pour évaluer cette question et documenter, en parallèle, l'apprentissage moteur avec un exosquelette. Diminution de la variabilité gestuelle ?



Des questions encore en suspens (2)

Le port d'un exosquelette a-t-il des effets à court terme différents s'ils sont évalués sur des périodes > 2 heures ?

- Des observations empiriques – dans le secteur de l'aéronautique – suggèrent que le port sur une période ± 2 heures fait apparaître des effets nouveaux : frottement, brûlure, inconforts, etc.



Les études qui évaluent les effets à court terme pourraient considérer rallonger la période de mesure : de ± 30 minutes à > 2 heures. Évaluation en situation réelle ?

Des questions encore en suspens (3)

Le port d'un exosquelette a-t-il des effets à long terme ?

Des effets délétères à long terme sont questionnés par les chercheurs (de Looze et al., 2016), les travailleurs (Schwerha et al., 2021) et les patients lombalgiques (Baltrusch et al. 2020) :

- Déconditionnement des structures anatomiques (muscles, ...) ?
- Déconditionnement du système nerveux central ?

Mesures des effets à long terme : on est prêt !



Atrophie et force musculaire

Contrôle moteur

- Proprioception
- Réflexes
- APA

Équilibre postural

Coordination musculaire

Stabilité lombaire

Laboratoire d'évaluation des fonctions neuromusculaires du tronc (Larivière)



Des questions encore en suspens (4) (Aubert)

Comment faire les « bons » réglages de l'exosquelette ?

La plupart des compagnies fournissent des repères pour ajuster adéquatement l'exosquelette sur les travailleurs, mais il demeure difficile d'effectuer ces réglages.

À quel niveau ajuster la tension ?

Les fournisseurs sont toutefois assez performants à effectuer ces réglages : comment font-ils, quels sont leurs repères ? Étude de leur activité ?



Des questions encore en suspens (5)

Que doit-on analyser dans le travail pour assurer qu'il soit « exosquelettable » ?

Projet de Norme : *Accord AC 786-800, 2017*

Les plus avancés à ce niveau : les collègues de l'INRS.

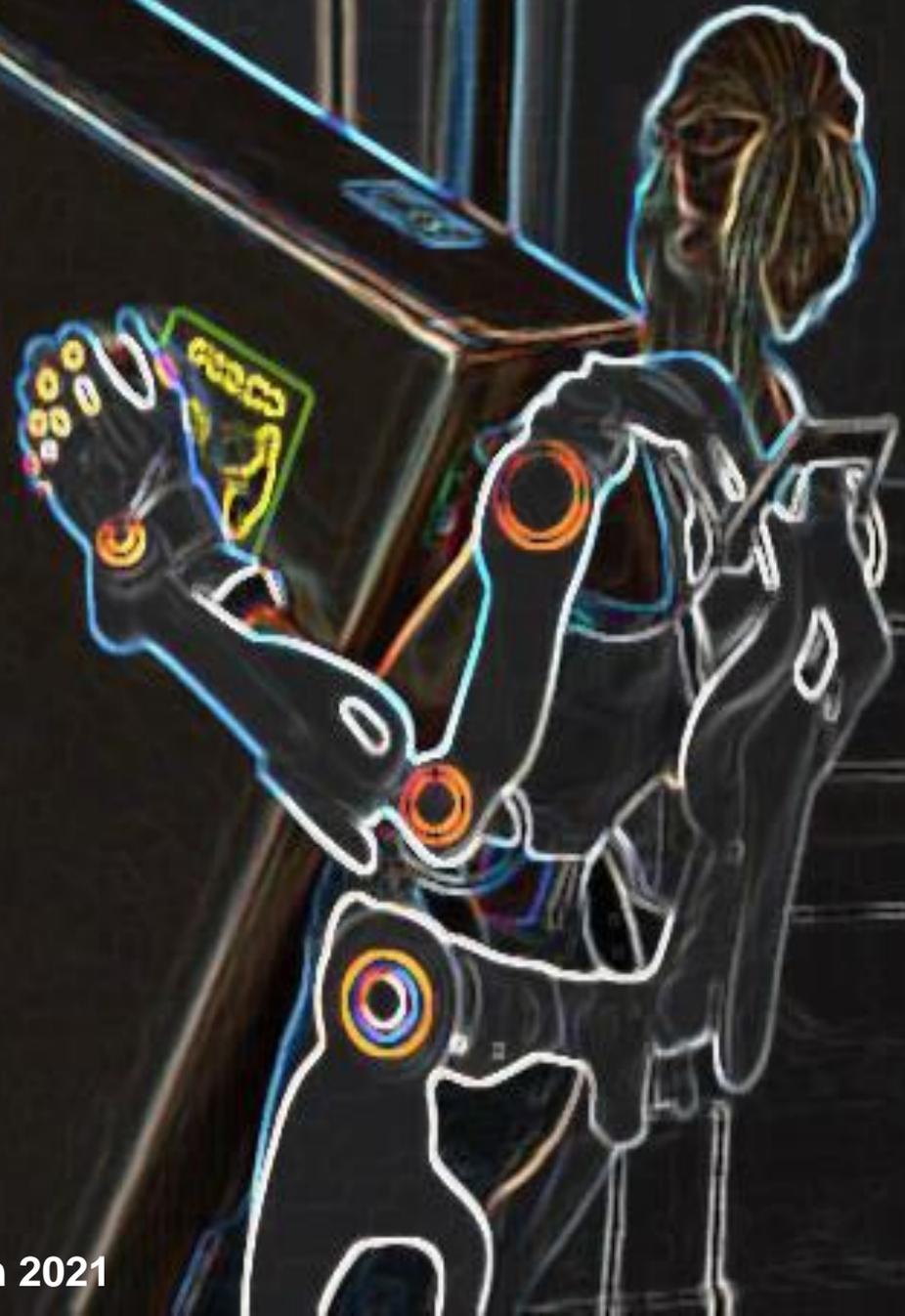
On retrouve encore peu de démarches formalisées et de retours d'expérience formels, publiés.

Une démarche d'implantation : comment ?



Notre accompagnement pour acquérir et intégrer un exosquelette

Les exosquelettes : solution ou mirage ?



15 juin 2021

Les exosquelettes : solution ou mirage ?



Nous ne croyons pas voir un mirage ! Les exosquelettes sont là pour rester. Nous en sommes (ici) au début.

Cependant, ce n'est pas la panacée : il ne s'agit pas d'une solution miraculeuse. Limites « techniques » toujours présentes.

Des développements, même s'il sont amorcés depuis les années 50, sont encore à faire pour rendre le produit plus attrayant.

Plusieurs préoccupations et questions demeurent.

Retour d'expérience : soyez vigilants

Problématique de prévention des TMS, et non d'augmentation des capacités : logique Robocop



Retour d'expérience : soyez vigilants



Problématique de prévention des TMS, et non d'augmentation des capacités : syndrome Robocop

Nachetez pas pour ensuite implanter : analyser d'abord vos besoins et identifier les modèles qui répondent le plus

L'exosquelette demeure un ÉPI : ce n'est pas la première solution à envisager. Travaillez d'abord à prévenir à la source

Faites-vous accompagner et impliquez les personnes concernées. Allez-y par étapes, progressivement. Notion d'acceptabilité.

Remerciements



Maud Gonella, professionnelle scientifique, IRSST

Christian Larivière, chercheur émérite, IRSST

Sophie Aubert, ergonomiste, Airbus

Tous les collègues qui ont généreusement partagé avec moi leurs expériences avec les exosquelettes : Anouk Aubert-Simard, Pascaline Éloy, Luc St-Marseille et François Ranger

Maura Tomi, conseillère en communications, IRSST