



EXATTRAC

Le rôle des EXosquelettes dans l'ATTRActivité des métiers de la Construction

Pilote :



Partenaires :



ÉTUDE 2023 - 2024

mecd.fr

Sommaire

1	Introduction.....	4
2	La pénibilité dans les secteurs de la construction.....	5
2.1	Qu'est-ce que la pénibilité ?	5
2.2	Quels sont les facteurs de pénibilité dans le secteur de la construction ?	5
2.2.1	Exposition à des contraintes physiques marquées	6
2.2.2	Exposition à un environnement physique agressif	7
2.2.3	Exposition à un rythme de travail particulier	9
3	Usages des exosquelettes dans la construction.....	10
3.1	Définition des exosquelettes et présentation d'exemple de modèles	10
3.1.1	Informations techniques	10
3.1.2	Réglementation	10
3.1.3	Benchmark sur les exosquelettes	11
3.2	Revue de littérature de l'usage des exosquelettes dans les secteurs de la construction	11
4	Compatibilité des postes avec une solution exosquelette	17
4.1	Sélection des postes.....	17
4.2	FCBA : Poste de bardage	18
4.3	FCBA : Poste de reconditionnement de palettes	20
4.4	CTICM : Poste de monteur chantier en charpente métallique.....	22
4.5	CTICM : Poste d'assembleur-soudeur en charpente métallique.....	24
4.6	CERIB : Poste de conditionnement manuel de palette.....	26
4.7	CERIB : Poste de ferrailleur / opérateur de fabrication	27
4.8	CTMNC : Poste de technicien chantier	29
4.9	CTMNC : Poste des entailles	31
5	La perception des entreprises : attractivité et exosquelettes ..	33
5.1	Attractivité perçue.....	33
5.2	Critères de recrutement de entreprises	34
5.3	La perception de la solution exosquelette	35
5.4	Les exosquelettes, une aide au recrutement ?	36
5.4.1	Des femmes ?	36
5.4.2	Des jeunes ?	37
5.4.3	Des seniors et/ou personnes avec fragilités physiques ?	38
6	La perception des apprenants : attractivité et exosquelettes ..	39
6.1	Attractivité des métiers.....	39
6.2	La perception de la solution exosquelette	40

7	Conclusion	41
8	Annexes	42
8.1	Annexe 1 : Benchmark sur les exosquelettes	42
8.1.1	Exosquelettes pour le tronc	43
8.1.2	Exosquelette pour les bras en hauteur	48
8.1.3	Exosquelettes pour les cervicales	54
8.1.4	Exosquelettes pour les membres inférieurs	55
8.1.5	Exosquelettes pour la manutention manuelle de charge	56
8.1.6	Exosquelettes pour le port d'outils	60
8.1.7	Exosquelettes pour les mains	62
8.2	Annexe 2 : Tableau des exosquelettes applicable au secteur de la construction	63
8.3	Annexe 3 : Liste d'études sur les exosquelettes dans la construction	64
8.3.1	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	64
8.3.2	PROJETS R&D	73
8.4	Annexe 4 : Détails des informations recueillies dans l'étude de la perception des entreprises	74

1 Introduction

Depuis plus de 20 ans, les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont la première cause de maladie professionnelle reconnue en France.

Les secteurs du bâtiment et des industries métallurgiques font partie des 7 secteurs les plus touchés par les TMS, qui représentent plus d'un tiers (35 %) des troubles musculo-squelettiques reconnus d'origine professionnelle en France (CNAM, 2019¹).

Le but de l'exosquelette est de soulager les efforts afin de limiter l'apparition des TMS et de rendre le travail plus soutenable sur le long terme. Alors, l'exosquelette peut aussi favoriser la mixité des emplois et le maintien dans l'emploi.

À ce jour, peu d'études analysent l'usage des exosquelettes dans le secteur de la construction (multi-matériaux). Les projets existants s'attellent à montrer l'intérêt technique des exosquelettes ou encore la question spécifique de l'acceptabilité et de l'acceptation de ces dispositifs par les opérateurs.

Cette étude vise donc à démontrer l'intérêt d'utiliser des exosquelettes aux postes de manutention du secteur de la construction, tant d'un point de vue technique que d'un point de vue social, en évaluant le **pouvoir d'attractivité de l'utilisation de ces exosquelettes** auprès de différentes catégories de population. Ce projet se distingue donc par une approche des Sciences Humaines et Sociales.

Les enjeux de ce projet sont multiples :

- Hygiène santé et qualité de vie au travail, sécurité des salariés (prévention des TMS) ;
- Limitation des arrêts de travail liés aux TMS (coût pour les entreprises et la société) ;
- Maintien des personnes dans l'emploi, notamment des personnes seniors et personnes pouvant présenter une fragilité physique particulière ;
- Féminisation des postes de manutention dans les secteurs de la construction ;
- Attractivité des emplois de manutention pour les jeunes.

¹ CNAM (2020). Rapport annuel 2019.
https://www.risquesprofessionnels.ameli.fr/fileadmin/user_upload/document_PDF_a_telecharger/brochures/Rapport%20annuel%20AMRP%202019.pdf

2 La pénibilité dans les secteurs de la construction

2.1 Qu'est-ce que la pénibilité ?

La pénibilité fait référence à une « exposition du travailleur à un ou plusieurs facteurs de risques professionnels [...] qui sont susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur sa santé. » (Code du travail numérique²).

Il existe dix facteurs de risques actuellement définis par le Code du travail (Articles L. 4161-1 et D. 4161-1) :

- Contraintes physiques marquées :
 - Manutentions manuelles de charges soit « toute opération de transport ou de soutien d'une charge dont le levage, la pose, la poussée, la traction, le port ou le déplacement, qui exige l'effort physique d'un ou de plusieurs travailleurs » (Article R4541-2 du Code du travail).
 - Postures pénibles définies comme positions forcées des articulations.
 - Vibrations mécaniques qu'elles soient transmises aux mains, aux bras ou à l'ensemble du corps (Article R4441-1 du Code du travail).
- Environnement physique agressif :
 - Agents chimiques dangereux, y compris les poussières et les fumées.
 - Activités exercées en milieu hyperbare.
 - Températures extrêmes.
 - Bruit.
- Rythmes de travail :
 - Travail de nuit sous certaines conditions.
 - Travail en équipes successives alternantes.
 - Travail répétitif caractérisé par la réalisation de travaux impliquant l'exécution de mouvements répétés, sollicitant tout ou partie du membre supérieur, à une fréquence élevée et sous cadence contrainte.

2.2 Quels sont les facteurs de pénibilité dans le secteur de la construction ?

Plusieurs études permettent de connaître les expositions actuelles des salariés aux risques professionnels.

Depuis 1978, en France, il a été instauré par le Ministère du travail, un dispositif national d'enquêtes statistiques sur les conditions de travail mené par la DARES (Direction de l'Animation de la Recherche, des Etudes et des Statistiques). Ce dispositif permet de décrire concrètement le travail, son organisation et ses conditions selon divers angles (horaires, rythmes de travail, risques encourus, pénibilité, sécurité, etc.). Cette étude est menée régulièrement tous les sept ans et la dernière à être publiée date de 2019.

Depuis 1994, la DARES réalise également une étude complémentaire appelée SUMER (SURveillance MEDicale des Risques professionnels) qui est réalisée par les médecins du travail et qui requiert la connaissance de la situation de travail des salariés. Cette enquête permet de cartographier les expositions aux risques professionnels des salariés, en France.

² Code du travail numérique (s. d.). Pénibilité. <https://code.travail.gouv.fr/glossaire/penibilite>

Elle communique également des informations sur la durée de ces expositions et les protections collectives ou individuelles éventuellement mises à disposition. De la même manière que l'étude Condition de travail, cette étude n'est pas réalisée tous les ans, la dernière datant de 2016-2017.

Nous allons, dans cette partie, nous appuyer principalement sur des données issues de ces deux études^{3 4}.

2.2.1 Exposition à des contraintes physiques marquées

Contraintes articulaires et posturales

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Contraintes posturales et articulaires	81	/	71,5
Position debout ou piétinement	61,9	38,5	48,7
Position à genoux et/ou accroupi	53,8	14,2	22,2
Contraintes posturales rachidiennes	50,7	18,9	35,5
Maintien des bras en l'air	45,5	7,8	19,4
Travail exigeant une position forcée d'une ou plusieurs articulations	39,6	13,4	18,2
Position fixe de la tête et du cou	28,8	11,9	25,5
Manutention manuelle de charges	58,8	/	34,3

Clés de lecture :

- En moyenne, 81% des salariés dans le secteur de la construction sont exposés à des contraintes posturales et articulaires alors que la moyenne pour l'ensemble des secteurs est à 71,5%.
- En moyenne, 38,5% des salariés dans le secteur de la construction sont exposés à une position debout ou à des piétinements plus de 10h par semaine.

³ Matinet, B., Rosankis, E., Tassy, V. (2020). Synthèse Stat' n°35, « Les expositions aux risques professionnels par secteur d'activité ». (étude SUMER, DARES)

⁴ Cnoct (Conseil national d'orientation des conditions de travail) (2020). Conditions de travail, bilan 2020.

Exposition aux vibrations

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Travail avec machines et outils vibrants	57,2	/	13,8
Outils transmettant des vibrations aux membres supérieurs	54,6	7,3	10,6
Vibrations créées par des installations fixes	14	3,7	5,4

Exposition à de la conduite

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Conduites (machine mobile, automobile, camion)	60	/	31,2
Conduite sur la voie publique (auto, camion, car, autobus)	52,7	9,9	25,5
Conduite de machine mobile sur le lieu de travail	21	5,8	8,4

2.2.2 Exposition à une environnement physique agressif**Exposition à des agents chimiques dangereux**

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Exposition à un ou plusieurs agents chimiques	57,5	22,5	32,2
Exposition à un ou plusieurs agents chimiques cancérogènes	35,7	/	11
Exposition à au moins un solvant	18,8	/	13,2
Exposition à au moins trois produits chimiques	29,4	/	14,6

Les agents chimiques les plus rencontrés dans le secteur de la construction sont :

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 2h/semaine	Ensemble des secteurs
Exposition à des hydrocarbures terpéniques et chaux sous toutes ses formes	23,3	16,4	2,2
Exposition à de la silice cristalline	12,3	7,4	1,4
Exposition à au moins un solvant	18,8	/	13,2
Exposition à d'autres carburants	11,5	2,8	4,5
Exposition à de la poussière de bois	10,8	7,6	1,8
Exposition à d'autres fibres minérales artificielles	10,4	5,6	1,7
Exposition à du white-spirit ou solvants naphta	10,4	3,2	2,3

Exposition au bruit

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Nuisances sonores	65,1	/	32,9
Bruit supérieur à 85 dB (A)	45,6	14,4	12,9
Bruit comportant des chocs et/ou impulsions	41,5	8,1	11,5
Bruit supérieur à 80 dB (A)	29,7	8	14
Autre bruit gênant	17,3	5,6	14,3

Exposition à des températures extrêmes

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Nuisances thermiques	50,8	/	21
Travail aux intempéries	49	26,5	14,4
Travail au froid imposé ($T^{\circ} < 15^{\circ}\text{C}$)	10,1	3,2	6,1
Travail au chaud imposé ($T^{\circ} > 24^{\circ}\text{C}$)	9,5	2,8	6,2
Travail en milieu humide imposé par le processus	5	1,2	2,5

2.2.3 Exposition à un rythme de travail particulier

Proportion de salariés exposés :	Dans le secteur de la construction	Exposition supérieure à 10h/semaine	Ensemble des secteurs
Gestes répétitifs à cadence élevée	16,4	5,6	14,9
Devoir toujours ou souvent se dépêcher	24,4	/	35
Travail de nuit entre 0 et 5h même occasionnel	10,5	/	14,2
Horaires variables d'un jour à l'autre	10,4	/	23,9
Tourner sur différents postes pour pallier les absences	20,5	/	18,4
Ne pas avoir une formation suffisante et adaptée pour effectuer correctement son travail	13	/	16,8

Finalement, nous remarquons que les opérateurs du secteur de la construction sont confrontés à de multiples facteurs de pénibilité : contraintes physiques, exposition à des agents chimiques dangereux, un environnement physique agressif (bruit et facteurs climatiques) et sont parfois exposés à ces risques plus que d'autres secteurs.

La majorité des contraintes sont liées aux contraintes posturales et articulaires (81%). Dans ces cas, lorsque la situation de travail ne peut être adaptée (environnement de travail, outils, etc.), les exosquelettes peuvent être une solution à envisager pour réduire des efforts.

3 Usages des exosquelettes dans la construction

3.1 Définition des exosquelettes et présentation d'exemple de modèles

3.1.1 Informations techniques

Pour bien comprendre ce que regroupe le terme « exosquelette », il est important de définir quelques termes. Ces définitions sont issues de la norme XP E 61-115⁵ portant sur les terminologies à utiliser sur ce sujet :

- Les dispositifs d'assistance physique professionnels (DAP) correspondent à une « structure se basant sur la restitution de l'énergie emmagasinée pour assister l'opérateur dans l'exécution des mouvements et/ou la compensation des efforts pour la réalisation de sa tâche professionnelle ».
- Les dispositifs d'assistance physique professionnels à contention (DAPac) sont des DAP « fixés à l'opérateur pendant l'utilisation et avec un lien permanent avec celui-ci ».
- Les robots d'assistance physique professionnel (RAP) correspondent aux « structures bénéficiant d'un système robotisé (couple commande-moteur) pour assister l'opérateur dans l'exécution des mouvements et/ou la compensation des efforts pour la réalisation de sa tâche professionnelle ».
- Les robots d'assistance physique professionnel à contention (RAPac) sont des « robots d'assistance physique professionnel qui est fixé à l'opérateur pendant l'utilisation et avec un lien permanent avec celui-ci ».

Le terme exosquelette englobe alors les dispositifs (DAPac) ainsi que les robots (RAPac) d'assistance physique à contention.

Plus simplement, l'INRS définit les exosquelettes comme étant des « systèmes mécanique ou textiles revêtu par les salariés et visant à leur apporter une assistance physique dans l'exécution d'une tâche, par compensation de leurs efforts et/ou une augmentation de leurs capacités motrices »⁶.

Il existe différents types d'exosquelettes selon les parties du corps (dos, membres inférieurs, supérieurs, etc.) mais aussi selon la technologie utilisées (électrique aussi appelés exosquelettes actifs, mécanique aussi appelés exosquelettes passifs).

3.1.2 Réglementation

En France, les exosquelettes sont encadrés depuis 2017 par un accord AFNOR AC Z68-800⁷ qui vise à permettre l'évaluation de l'interaction des exosquelettes avec l'homme. Ce guide AC Z68-800 met à disposition des outils et des aides méthodologiques pour évaluer l'usage de ce dispositif sur l'activité physique de l'utilisateur et également son ressenti et son expérience. De même, il liste les différents paramètres de l'exosquelette à passer en revue et propose des recommandations quant à la manière de réaliser cette évaluation. Les méthodes proposées dans la norme permettent également une étude des exosquelettes avant même leur mise en

⁵ XP E 61-115 : Robots et composants robotiques — Dispositifs d'assistance physique — Terminologie

⁶ INRS (2022). Industrie du futur : les technologies de production avancées. <https://www.inrs.fr/inrs/themes-travail/industrie-du-futur/technologies-production-avancees.html>

⁷ AC Z68-800 - Dispositifs d'assistance physique à contention de type exosquelettes robotisés ou non - Outils et repères méthodologiques pour l'évaluation de l'interaction humain-dispositif - https://www.boutique.afnor.org/norme/ac-z68-800/dispositifs-d-assistance-physique-a-contention-de-type-exosquelettes-robotises-ou-non-outils-et-reperes-methodologiques-pour-l/article/877167/fa188829?_ga=2.58916399.305783737.1497425895-1339808128.1497425895

œuvre, voire avant leur fabrication. Dès lors, ce guide s'adresse aussi bien aux concepteurs, fournisseurs qu'aux utilisateurs des exosquelettes.

Cet accord de 2017 donne lieu à la publication en 2023, de la norme NF X35-800 accompagnant « la démarche de prévention par la définition d'une méthode d'intégration des dispositifs et robots d'assistance physique professionnels à contention (DAPac/RAPac) comprenant l'expression des besoins, la sélection, la conception, l'évaluation et le déploiement dans un organisme » (NF X35-800). Même si l'accord AC Z68-800 aborde le sujet des DAPac/RAPac, il ne traite pas de la méthode d'intégration comme le fait cette norme.

En parallèle de ces textes réglementaires, l'INRS s'intéresse à ce sujet depuis de nombreuses années et a publié un certain nombre de références (idées reçues, points de vigilance, état des connaissances, etc.).

3.1.3 Benchmark sur les exosquelettes

Les avancées dans le domaine des exosquelettes offrent aujourd'hui une diversité de solutions pour répondre aux besoins variés de l'industrie, bien que l'offre actuelle ne couvre pas encore toutes les exigences. Afin de faciliter notre analyse, nous avons réalisé un benchmark (non exhaustif) répertoriant les principales solutions d'exosquelettes disponibles à l'échelle mondiale, spécifiquement destinées à l'industrie et excluant les applications médicales ou militaires.

Ce benchmark, structuré en sept catégories distinctes, présente une cartographie complète des différentes typologies d'exosquelettes, couvrant diverses zones telles que le tronc, les bras en hauteur, les cervicales, les membres inférieurs, la manipulation de charges, le port d'outils et les mains, permettant ainsi de comparer différents exosquelettes d'une même catégorie.

En plus des données descriptives des exosquelettes, notre étude inclut, lorsque disponibles, des détails tels que les prix, les spécifications (poids, tailles disponibles) et des retours d'expérience tirés de l'étude de l'OPPBTP⁸.

Pour consulter ce benchmark, veuillez-vous référer à l'Annexe 1 de ce rapport (page 42).

3.2 Revue de littérature de l'usage des exosquelettes dans les secteurs de la construction

En effectuant des recherches dans des articles scientifiques et des projets européens, l'état actuel des connaissances sur l'utilisation des exosquelettes dans le domaine de la construction à l'échelle mondiale a pu être appréhendé. Cependant, aucune des études consultées n'a étudié l'attractivité des exosquelettes pour les professionnels de ces secteurs.

Selon la littérature, les exosquelettes et leur utilisation dans les secteurs de la construction ont fait l'objet d'études fréquentes, en particulier aux États-Unis, en Chine et en Europe (Allemagne, Angleterre, Italie, France). Ces études adoptent généralement deux approches

⁸Girardot P. (2023). Exosquelettes, dispositifs d'assistance physique : 50 modèles à la loupe ! https://www.preventionbtp.fr/actualites/risques/exosquelettes-dispositifs-d-assistance-physique-50-modeles-a-la-loupe_UXDWVx8h8XELCdAehV3XQH

distinctes : les tests en conditions réelles et les études théoriques, telles que les consensus scientifiques ou les méta-analyses. Toutefois, leur application pratique est souvent complexe, car malgré la similarité des postes entre différents pays, leur exécution peut s'avérer très différente.

Lors de la mise en place d'exosquelettes, il est crucial de prendre en considération l'ensemble des tâches des opérateurs afin de garantir leur adaptation et d'éviter tout risque de contrainte excessive. Malgré cela, certaines études de tests en conditions réelles restent des ressources pouvant être précieuses, comme l'étude de Okpala et al. (2022)⁹ concluant par un listage d'exosquelettes applicables au secteur de la construction selon les tâches réalisées (Annexe 2, page 63).

Par exemple, on y retrouve :

- L'exosquelette EXO-01 (Hilti), un exosquelette passif pour le haut du corps, identifié comme adapté lors des tâches répétitives mobilisant les bras en hauteur.
- L'exosquelette Flex Lift (Kinetic Edge), un exosquelette passif pour le corps entier, identifié comme adapté lors des tâches de flexion avant du tronc, de port de charge et de station debout prolongée.
- L'exosquelette Iron Hand (Bioservo), un exosquelette actif pour poignet, identifié comme adapté lors de tâches nécessitant une préhension manuelle.



Illustrations : EXO-01 d'Hilti (1), Flex Lift de Kinetic Edge (2) et Iron Hand de Bioservo (3)

Pour présenter les conclusions actuelles de ces recherches, les résultats de l'étude américaine menée par Mahmud et ses collaborateurs en 2022 ont été adaptés (« Identifying Facilitators, Barriers, and Potential Solutions of Adopting Exoskeletons and Exosuits in Construction Workplaces ») dans le tableau ci-dessous. Ce consensus scientifique a été établi au moyen de la méthode Delphi et avec la collaboration de divers experts universitaires, industriels et

⁹Okpala, I., Nnaji, C., Ogunseiju, O. & Akanmu, A. (2022). Assessing the Role of Wearable Robotics in the Construction Industry: Potential Safety Benefits, Opportunities, and Implementation Barriers. 10.1007/978-3-030-77163-8_8.

gouvernementaux possédant des connaissances et des expériences pertinentes dans ce domaine. Cette étude a permis d'identifier les facteurs pouvant être facilitants, des obstacles et des solutions potentielles pour favoriser l'adoption des exosquelettes. Ces résultats ont été réajustés pour refléter la réalité française, notamment en termes de législation, d'organismes compétents, etc. Par exemple, contrairement aux États-Unis où aucune réglementation spécifique n'existe concernant cette technologie, la France dispose de diverses normes et recommandations pour encadrer la mise en place de ces dispositifs.

Pour plus de précisions, les articles et projets faisant partie de cette recherche sont disponibles en Annexe 3 de ce rapport (page 64).

Adaptation des résultats de Mahmud et al. (2022).

Thématiques	Exemples de facteurs facilitateurs	Exemples d'obstacles	Solutions potentielles
Entreprise	- Augmentation de l'efficacité (moral et productivité). - Possibilité d'impacts économiques positifs : - Création d'emploi pour les experts de l'utilisation, la formation et la certification des exosquelettes ; - Réduction des blessures et des indemnités des travailleurs ; - Diminuer les pénuries de main-d'œuvre.	- Coût des exosquelettes : - Achat initial et entretien ; - Propriété de l'entreprise ou du travailleur ? - Manque de confiance dans les avantages revendiqués (pas assez d'études scientifiques objectives). - Quantification difficile du retour sur investissement. - Implantation et personnel (qui s'en occupe, gestion de l'inventaire, formation du personnel, etc.). - Mise en place d'un exosquelette inadéquat. - Impacts inconnus sur le modèle de travail.	- Travailler en collaboration avec des syndicats, écoles, association et apprentis. - Fournir une formation aux travailleurs (sensibilisation, utilisation des exosquelettes en dehors du travail). - Enseignement dès le lycée ou l'université sur l'existence de cette technologie. - Recommandations des médecins. - Plus de données scientifiques pour valider les intérêts des exosquelettes. - Plus d'étude de cas permettant d'objectiver les résultats. - Travailler avec des experts en exosquelettes.
Technologie	- Secteur d'investissement. - Feedback en direct sur l'utilisation des exosquelettes.	- Coûts de la recherche et développement (R&D) : risque de l'investissement. - Contraintes possibles liées à la performance au travail : - Technologie encombrante ; - Mise en place et retrait ; - Contraintes de mouvement. - Personnalisation : - Interaction avec EPI et EPC ; - Exosquelettes actifs vs passifs ; - Généralement spécifique à une tâche. - Manque de mesures standards : différences entre les procédures de tests. - Contraintes liées au respect de la vie privée (suivi de position (GPS), réponses physiologiques, etc.).	- Développement itératif de produits : - Amélioration du temps d'ajustement ; - Facilité d'utilisation et de compréhension ; - Légèreté. - Intégration avec les EPI, EPC et les autres outils. - Feedback en direct des impacts de l'utilisation des exosquelettes. - Exosquelettes orientés tâche vs exosquelettes orientés fonction vs exosquelettes orientés anatomie. - Généralisation vs « de niche ». - Règles de confidentialité sur les données récoltées.
Organisation	- Syndicats. - Secteur des assurances. - Acteurs de la santé au travail : - Médecine du travail ; - Organismes de la Sécurité Sociale (CCMSA, CNAM) ; - Organismes de prévention (OPPBT, INRS, ANACT) ; - Organismes d'expertise scientifique (ANSES, ANSP, IRSN). - Cadre normatif existant sur la méthode d'intégration (NF X35-800).	- Les étapes décisionnelles à la mise en place d'un exosquelette : - Décision financière (coûts, bénéfices, sécurité, etc.) ; - Utilisation de la technologie (sur quel poste est-ce le mieux à mettre en place ? etc.) ; - Augmentation du travail administratif ; - Dispositions supplémentaires en termes de formation ; - Responsabilités. - Absence d'un cadre normatif sur le suivi. - Culture d'entreprise. - Dominance des petites entreprises.	- Etudes éprouvées et données issues des chantiers. - Procédure établie sur la gestion de la responsabilité. - Formation et sensibilisation continue.

Publications des Experts

Thématiques	Exemples de facteurs facilitateurs	Exemples d'obstacles	Solutions potentielles
Politiques et réglementation	- Promotion par des tiers. - Aides de différents organismes pour les entreprises. - Création de la norme française NF X35-800 (« <i>Méthode d'intégration des dispositifs et robots d'assistance physique à contention de type exosquelette</i> »).	- Absence de politiques, réglementations, normes ou de règles syndicales sur l'usage des exosquelettes. - Difficultés et lenteurs du développement de réglementation au niveau national. - Différences entre les politiques (exemple entre US et EU). - Manque de référence faisant autorité pour intégrer les exosquelettes comme EPI (obligation). - Le flou sur la considération des exosquelettes en tant qu'EPI.	- Données scientifiques pour orienter la réglementation et l'élaboration des politiques. - Travailler en collaboration avec des syndicats, des organismes et associations. - Formation. - Bouche à oreille. - Elaborer des standards de bonnes pratiques en entreprise. - Régulation pour une utilisation dans des conditions difficiles.
Ergonomie et sécurité	Prévention des troubles musculo-squelettiques.	- Risques pour la sécurité : - Défaillance des exosquelettes ; - Idées reçues sur la capacité augmentée ; - Risque de blessures résiduelles ; - Atrophie musculaire ; - Maladies et blessures préexistantes. - Risques supplémentaires : - Perte d'équilibre ; - Différences selon les conditions météorologiques ; - Conditions de travail différentes. - Confort : Restrictions de mouvement ; Poids des exosquelettes ; Surmenage ; Douleurs, courbatures et inconforts. Mesures objectives par rapport aux avantages et aux risques : Manque de littérature fiable ; Présence d'encore beaucoup d'inconnues sur l'utilisation réelle.	- Utiliser uniquement pour les tâches prévues. - Fournir des preuves solides. - Elaborer des protocoles d'inspection. - Etablir un guide des bonnes pratiques pour éviter les atrophies et assurer la sécurité. - Exemples pour illustrer les impacts (positifs et négatifs). Réglementation pour une utilisation sécuritaire des exosquelettes.

Publications des Experts

Thématiques	Exemples de facteurs facilitateurs	Exemples d'obstacles	Solutions potentielles
Utilisateurs finaux (travailleurs)	• Maintien dans l'emploi. • Sentiment d'efficacité personnelle. • Amélioration de la facilité d'utilisation. • Coûts réduits. • Perception positive du produit. • Résultats tangibles (physique et liés à la productivité). • Entraînement. • Assistance des fabricants d'exosquelettes.	• Difficultés à utiliser (courbe d'apprentissage abrupte). • Réticence à l'utilisation. • Préoccupations liées au suivi (GPS, physiologiques, etc.). • Satisfaction des travailleurs : - Travailleurs non consultés ; - Perception des avantages concrets. • Impacts sur l'emploi : - Droit au refus ; - Impact sur le nombre de poste ; - Maintien dans l'emploi des travailleurs ne pouvant porter les exosquelettes mis en place dans l'entreprise (douleurs, maladies, etc.). • Préoccupations liées aux risques de blessures liées au port des exosquelettes. • Stigmatisation. • Incompatibilité avec certains environnements de travail.	• Assez simple pour essayer. • Recherche, éducation et formation. • Implication de la direction des entreprises et campagnes de bien-être au travail. • Rendre les exosquelettes invisibles ou visuellement attrayants. • Bénéfices perceptibles et mesurables.

4 Compatibilité des postes avec une solution exosquelette

4.1 Sélection des postes

Afin de déterminer les postes les plus pertinents pour une intégration d'exosquelettes dans le cadre du projet EXATTRAC, nous avons élaboré un modèle de fiche de poste à compléter par chaque partenaire. Cette fiche comprenait plusieurs parties telles que la description de l'activité, le niveau des aides mécaniques présentes, le niveau de répétitivité des gestes, les postures contraignantes, les solutions possibles, etc. Au total, 19 fiches ont été élaborés. Par la suite 2 postes ont été sélectionnés par secteur, sous la base de plusieurs critères tels que : la représentativité du poste dans les entreprises, l'importance des contraintes physiques ainsi que la possible compatibilité avec une solution exosquelette.

Grâce à ce travail, il a été choisi de se concentrer sur les postes suivants :

- Pour le secteur de la construction métallique (CTICM) :
 - Le poste d'assemblage – soudage ;
 - Le poste de monteur sur chantier de charpente métallique ;
- Pour le secteur des matériaux naturels de construction (CTMNC) :
 - Le poste de technicien chantier ;
 - Le poste d'entailles de pierres ;
- Pour le secteur de la construction béton (CERIB) :
 - Le poste de conditionnement manuel de palettes ;
 - Le poste de ferrailleur ;
- Pour le secteur de la construction bois (FCBA) :
 - Le poste de pose de bardage ;
 - Le poste de reconditionnement de palettes.

Des visites d'entreprises ont été effectuées sur ces postes, afin d'étendre notre compréhension et notre analyse de ces derniers.

Certains postes ont été choisis pour leur caractère transversal entre plusieurs secteurs. Par exemple, le poste de conditionnement de palettes se retrouve à la fois dans les secteurs de la construction en béton, de la construction en bois et des matériaux naturels de construction.

L'objectif des parties suivantes est de synthétiser la présentation des postes de travail, analyser leur compatibilité avec une solution exosquelette et mettre en valeur les critères à prendre en compte en vue d'un développement/ déploiement d'un exosquelette. Nous précisons cependant que cette analyse est conditionnée par les caractéristiques propres aux entreprises visitées. Il est important de noter que la présentation des postes de travail n'est pas exhaustive et ne constitue pas un diagnostic complet. Par conséquent, les pistes envisagées pour l'amélioration des conditions de travail ne garantissent pas leur application à l'ensemble des entreprises.

4.2 FCBA : Poste de bardage

Objectif du poste : Poser les revêtements extérieurs/ le bardage

Description de l'activité de l'opérateur :

- Porter les paquets de lames
- Porter les lames : commence toujours par clouer le bas, puis remonte au fur et à mesure (la première lame est plus difficile à poser, les lames d'après s'emboîtent généralement)
- Répéter le processus avec les autres lames

Principales contraintes observées : Nos observations nous ont permis de mettre en valeur 4 actions pouvant être contraignantes physiquement :

1) Porter et maintenir des lames pour les fixer

Ce port de charge engendre des efforts importants pour les opérateurs. Cette tâche s'effectue à plusieurs afin d'alléger les contraintes.

Point de vigilance avec un exosquelette : l'encombrement d'un exosquelette potentiel pouvant aider au port de charge en hauteur, pourrait rendre impossible / très compliqué le travail collaboratif nécessaire sur cette activité.



Port de charge à plusieurs

2) Lever les bras pour positionner des lames ou d'autres éléments sur la façade

Cette contrainte n'est finalement pas toujours répandue car les opérateurs ont généralement des nacelles électriques, permettant de se mettre à une hauteur confortable facilement.

Si les opérateurs sont sur des échafaudages (et non en nacelle électrique), un exosquelette peut être envisagé, mais le risque qu'il soit gênant pour les autres tâches est très présent.

Exemple d'exosquelette possible : Exosquelette ExoActive 18 (Festool) ; Hapo MS (Ergosanté)

3) Le port d'outil (pour maintenir une cloueuse par exemple)

Point de vigilance : attention à la visibilité et à l'encombrement

Exemple d'exosquelettes possibles :

- Hapo MS (Ergosanté) pour maintenir plus facilement les bras
- Exosquelette Exo-T-22 (Hilti) pour porter l'outil



Buste penché

4) Se baisser pour prendre des éléments ou pour poser les premières lames de la façade

Cette contrainte est présente lors d'une durée peu importante sur toute l'activité et ne semble pas être une véritable contrainte pour les opérateurs.

Pour la pose des premières lames au niveau du sol, un exosquelette pourrait être envisagé. Toutefois, il faudrait un exosquelette qui ne dérange pas l'opérateur pour le reste de son activité.

- Exemple : exosquelette Liftsuit (Auxivo), Bisko (Exofair)
- Pour la prise des éléments au sol : des chariots avec une mise à hauteur automatique pourrait être envisagée dans les nacelles.

Autres points de vigilance :

- Certains opérateurs peuvent être amenés à descendre régulièrement de la nacelle : le recours à un exosquelette ne doit pas augmenter le risque de chute.
- Tâches effectuées à l'extérieur : les exosquelettes ne sont pas toujours compatibles avec la pluie (ou un poncho doit être mis).

Conclusion : Plusieurs contraintes peuvent être évitées par l'utilisation d'autres solutions (ex : utiliser la nacelle électrique pour éviter d'avoir les bras en hauteur, utiliser un système pour rehausser la hauteur des éléments poser au sol...). Des exosquelettes restent envisageables pour ce poste, mais ne répondent pas à toutes les contraintes rencontrées. Pour optimiser l'acceptation de l'exosquelette, une modification de l'organisation du travail serait à envisager/ à réfléchir (par ex : la personne sur la nacelle qui a un exosquelette devra rester sur la nacelle le plus possible).

L'exosquelette Hapo MS (Ergosanté) semble être le plus pertinent à tester sur ce poste.

4.3 FCBA : Poste de reconditionnement de palettes

Description de l'activité de l'opérateur :

Le reconditionnement de palettes regroupe 2 grandes activités : le tri des palettes et la réparation de palette.

Le tri consiste à trier des palettes mélangées pour les mettre sur les bonnes piles.

Ce poste peut présenter différentes caractéristiques en fonction des entreprises (environnement de travail extérieur ou intérieur, zone de déplacement, présence d'outils d'aide à la manutention de type Vacuum ou non, nombre de palettes à trier, etc).

Pour autant, nous observons que tous ces postes sont très sollicitant pour les opérateurs qui sont soumis à des gestes répétitifs, du port de charge ainsi qu'à des postures contraignantes fréquentes :

- Les épaules en hauteur lorsqu'il faut prendre ou déposer les palettes sur le haut de la pile,
- Le buste penché en avant pour prendre et déposer les palettes en bas de la pile



Tri

Le recours aux exosquelettes pourrait être intéressant, notamment pour assister la posture « buste penché en avant ». Toutefois, il est important que l'exosquelette ne soit pas une contrainte lors des déplacements.

Exosquelettes pertinents : Cray-X (German Bionic), Hapo (Ergo santé)

La réparation consiste à traiter des piles de palettes non utilisables en effectuant une réparation des palettes ou en récupérant certains éléments de la palette si elle n'est pas considérée comme réparable. La réparation peut être plus ou moins mécanisée en fonction des entreprises.

Les contraintes physiques sont d'autant plus présentes pour les postes les plus manuels, notamment à travers les tâches de port de charge pour amener la palette jusqu'à la table de réparation, ainsi que les contraintes posturales (buste penché en avant) pour prendre et déposer les palettes en bas de la pile ou lors de la réparation pour atteindre des éléments non accessibles devant l'opérateur (milieu de la palette par exemple).



Réparation de palette

Pour les postes de réparation semi-automatique, les exosquelettes présentent peu d'intérêt. En revanche, pour les postes de réparation manuelles, nous pensons que le recours aux exosquelettes peut être envisagé pour assister la posture « buste penché en avant ».

Plusieurs points de vigilances ont tout de même été relevés :

- L'exosquelette ne doit pas gêner lors des opérations de réparation.
- Adéquation entre l'exosquelette et d'autres équipements (ex : le versaflo)

Exosquelette pertinent : Liftsuit (Auxivo), Bisko (Exofair)

Conclusion : Sur les postes de tri (avec ou sans aide à la manutention) le Cray-X (German bionic) ou le Hapo (Ergosanté) peut être pertinent. Sur le poste de réparation manuelle, le Liftsuit (Auxivo) ou le Bisko (Exofair) l'est également.

4.4 CTICM : Poste de monteur chantier en charpente métallique

Objectif du poste : Installer sur chantier les charpentes métalliques (bâtiment, passerelle, etc.).

Description de l'activité de l'opérateur : Il a été observé le montage d'une structure principale (ou structurelle). Cette fiche ne s'applique pas au montage d'une structure secondaire (manteaux de bardage).

Etapes clés :

- 1) Déchargement des camions et tri des différents éléments (pièces de charpente, quincaillerie) (en début de chantier) ;
- 2) Pré-assemblage au sol des éléments (déjà pré-assemblés en usine de façon à limiter les actions d'assemblage sur chantier) ;
- 3) Montage final de la structure.

Les étapes 2 et 3 sont alternées durant toute la durée du montage de la structure principale.

Lors du montage (étape 3), les opérateurs travaillent en nacelle télescopique ou articulée afin de pouvoir naviguer en hauteur autour de la structure. La structure, elle, est tenue en hauteur par une grue. Lors des observations, les opérateurs fixaient les structures à l'aide de boulons, tenant dans une main la boulonneuse et dans l'autre, une clé pour les écrous. De plus, cette tâche doit être réalisée en miroir par le binôme de monteur afin d'assurer la meilleure fixation possible des éléments.

Cette activité est réalisée en équipe et le rythme de travail est généralement donné par le chef de chantier. Lors des observations, l'équipe était constituée de 3 opérateurs : 1 chef de chantier manipulant également la grue et 2 monteurs.

Ce poste de travail se confronte aux intempéries (froid, neige, pluie, etc.). Les opérateurs travaillent en extérieur et continuent de travailler généralement peu importe les intempéries extérieures.

Principales contraintes observées :

1) Port de charge

Nous avons pu observer 2 types de port de charge :

Le port de charge d'éléments lourds et imposants : divers éléments sont transportés à la main lors des étapes 1 et 2 comme des barres métalliques pouvant dépasser 25kg et ayant des dimensions pouvant aller jusqu'à 3m de long sur 20cm.

- *Pour rappel, les ports d'éléments avec des dimensions plus importantes sont assurés par la grue.*

Le port de charge des éléments de quincaillerie : ces éléments sont plus petits et légers que les barres métalliques, cependant ils peuvent devenir répétitifs et engendrent des allers-retours



Exemple de barres métalliques



Exemple d'éléments de quincaillerie

entre le lieu d'assemblage et le stock (pouvant dépasser les 10m de distance).

NB : le placement des éléments lors du tri dépend de la taille du chantier en lui-même, les éléments ne seront pas déplacés selon l'avancement du montage de la charpente, demandant parfois aux opérateurs de traverser le chantier pour aller chercher des pièces.

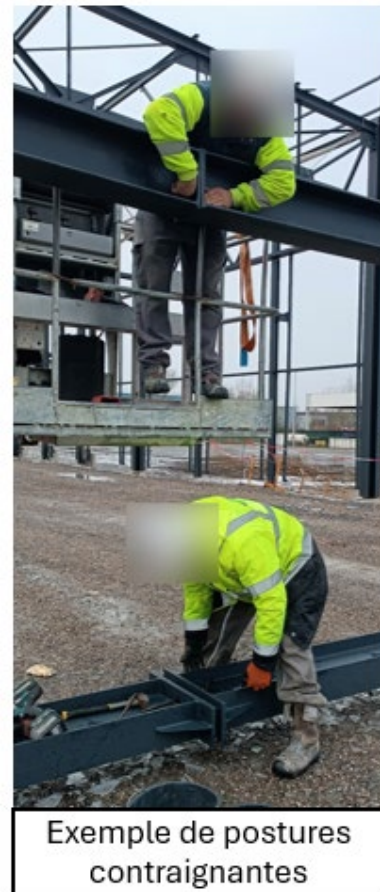
2) Postures contraignantes

Cette activité entraîne une multitude des postures pouvant être jugées contraignantes :

- Des flexions du tronc de plus de 45° notamment lors du pré-assemblage au sol et du montage des éléments en hauteur.
- Des flexions latérales et torsions, par exemple lors de la fixation de boulons en hauteur. Pour rappel, les opérateurs avaient une boulonneuse dans une main et une clé pour les écrous dans l'autre main. La structure étant imposante, cela conduit à des postures contraignantes (« On fait comme on peut »).
- Du travail à bout de bras et bras en hauteur.
- Des postures accroupies, notamment lors du montage au sol.

Points de vigilance :

- Port d'un harnais.
- Déplacements pouvant aller à plus de 10m selon les chantiers.
- Nacelle : 50cm de large pour l'opérateur.
- Port sur les épaules des éléments lourds (barres métalliques)



Exemple de postures contraignantes

Conclusion : Si une solution exosquelette est mise en place, il est nécessaire qu'elle ne soit pas encombrante, qu'elle soit étanche et résistante à la poussière et la saleté. Cependant, à l'heure actuelle, il semblerait qu'aucun exosquelette ne puisse convenir pour l'entièreté de cette activité. Lors du montage de la charpente au sol et du tri, le Liftsuit (Auxivo) ou le Bisko (Exofair) pourraient être intéressants malgré le port d'élément sur les épaules car ils peuvent être portés sous les vêtements de protection, ce qui les protégerait également. Concernant les tâches réalisées en nacelle, un exosquelette pour bras en hauteur pourrait être intéressant comme le ExoActive de Festool, mais son encombrement peut être un problème à sa mise en place et à son acceptabilité.

4.5 CTICM : Poste d'assembleur-soudeur en charpente métallique

Objectif du poste : Assurer le bon assemblage des charpentes métalliques.

Description de l'activité de l'opérateur : Cette activité est généralement réalisée par un opérateur seul ou en binôme (1 assembleur et 1 soudeur) et est réalisée en intérieur.

- 1) Tâches d'assemblage :
 - a. Lecture du plan d'assemblage.
 - b. Préparation des matériaux nécessaires sur le parc (poutrelles, cornières, etc.).
 - c. Grugeage des matériaux selon les besoins
 - d. Pointage : mise d'un point de soudure afin d'assurer le maintien et l'axe des éléments.
- 2) Tâches de soudage :
 - a. Soudage des éléments préalablement assemblés.
 - b. Meulage des angles.
 - c. Mise de la finition : peinture antirouille, finition brillante, etc.

Les opérateurs peuvent être amenés à utiliser divers outils comme des torches à souder, des maillets, des ponceuses, des meuleuses, des perceuses, etc.

Contraintes observées :

1) Le port de charge

Concernant la manipulation des matériaux à assembler et souder, les ateliers sont spatialement organisés de manière à avoir les postes les uns à la suite des autres, permettant ainsi de manutentionner les éléments le moins possibles (et sans aller-retours).

La manipulation des matériaux est assurée par un pont roulant ou réalisée à l'aide d'un chariot, même s'il arrive que certains opérateurs continuent de manutentionner eux-mêmes les éléments considérés comme les plus légers (pouvant pourtant aller à une vingtaine de kilos). Lorsqu'un chariot est utilisé, il est nécessaire de placer les pièces dessus et de les manipuler à nouveau, pour leur mise en place. De plus, certaines pièces demandent à être maintenues par l'opérateur afin de pouvoir être assemblées.



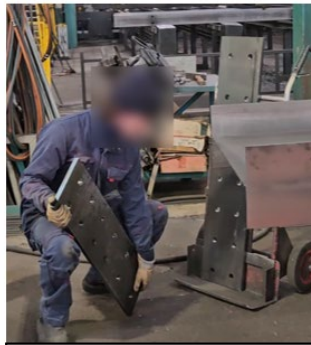
Le port de charge est aussi induit par le port des outils nécessaires à la réalisation des tâches. À titre illustratif, lors des étapes de soudure, les torches de soudure peuvent être maintenues jusqu'à 30% du temps allouées à cette tâche. La contrainte réside alors davantage dans le maintien du port de ces outils.

Poids des outils observés (selon les marques) :

- Torche de soudure : 1,5 kg à 5 kg (aspirante ou non).
- Maillet : 5 kg à 10 kg.
- Meuleuse, ponceuse : 1 kg à 2 kg.

2) Les postures contraignantes

Lors de l'assemblage, la manutention des éléments à assembler peut entraîner des postures contraignantes, notamment avec l'utilisation d'un chariot : il est nécessaire de « s'abaisser » pour récupérer les éléments, provoquant alors une posture accroupie ou une importante flexion du tronc vers l'avant.



Opérateur manipulant une pièce d'un chariot



Opérateur soudant

Les ateliers sont généralement équipés de tréteaux afin de surélever les ouvrages à un minimum de 90cm du sol. Cependant, afin d'assurer le bon angle lors du soudage, certains opérateurs peuvent être amenés à utiliser des escabeaux pour atteindre les parties supérieures des ouvrages. L'usage des escabeaux est une aide, mais cela n'empêche pas d'observer de fortes flexions du tronc vers l'avant, pouvant aller de 20° à 90°.

Dans le cas où les opérateurs utiliseraient des torches de soudage aspirantes, la posture associée est différente de celles sans aspiration. L'angle de soudage doit être adapté afin d'assurer la bonne aspiration des fumées de soudure.

Autres points de vigilance :

- Projection de particules lors de la découpe des éléments et de la soudure.
- Aide des cuisses lors de la manutention manuelle de certaines pièces.

Conclusion : Des aménagements de l'espace de travail peuvent être envisagés pour soulager certaines contraintes comme l'usage de semi-portiques ou d'un système de potence qui permettent de surélever les gaines des torches par rapport au sol et de soulager les opérateurs de leurs poids. Cependant, cela ne semblera pas soulager l'ensemble des contraintes observées, les exosquelettes peuvent alors être des solutions, notamment le Hapo MS d'Ergo santé.

4.6 CERIB : Poste de conditionnement manuel de palette

Objectif du poste : Conditionner à la main des palettes de dalles en béton.

Description de l'activité de l'opérateur : L'opérateur est présent en fin de ligne de production, il prépare les palettes et positionne une par une les dalles de béton. Une fois la palette terminée, l'opérateur la sécurise à l'aide de calles et de colliers de serrage, fait sécher et enfin housse la palette.

Cette activité est réalisée en intérieur, en autonomie, sur une ligne de production semi-automatisée¹⁰. Lors des observations, l'opérateur se déplaçait principalement entre la palette et le convoyeur (moins de 2m) et lorsqu'il était nécessaire de se déplacer davantage, les déplacements ne dépassaient pas 5m de distance.

Principales contraintes observées :

1) Port de charge et répétitivité

Le poids unitaire des dalles oscille entre 5kg et 22kg selon la typologie de dalle, ce qui conduit à un conditionnement de palette allant de 800kg à 1300kg.



2) Postures contraignantes

Diverses postures contraignantes peuvent exister sur ce type de poste de travail :

- Station debout prolongée ;
- Flexions latérales ;
- Torsions.

Conclusion : Une solution exosquelette ne semble pas être des plus pertinents sur ce poste. En effet, il est recommandé de mettre en place ce type de solution que lorsque les contraintes générant des efforts musculaires et/ou des postures contraignantes ne peuvent être évitées avec une amélioration de l'environnement de travail. Or, les contraintes observées semblent pouvoir être évitées en mettant en place divers équipements comme des tables tournantes à niveau constant ou une ventouse manuelle. Cependant, s'il n'est pas possible de mettre en place ce type de solution, le recours à des exosquelettes aidant dans les tâches de manutention peut être envisagé comme le Cray X de German Bionic.

¹⁰ Ligne de production semi-automatisée : chaîne de fabrication combinant des processus automatisés effectués par des machines avec des tâches manuelles nécessitant l'intervention d'opérateurs.

4.7 CERIB : Poste de ferrailleur / opérateur de fabrication

Objectif du poste : Fabriquer des éléments en béton (exemple : prédalles, poutrelles)

Les observations ont été réalisées sur un poste de fabrication de prédalles sur pistes.

Description de l'activité de l'opérateur : cette activité peut être réalisée sur des carrousels de palette ou sur des pistes.

L'activité des opérateurs est divisée en 3 tâches :

- 1) La préparation : préparation de la piste ou du carrousel (nettoyage, huilage, mise en place de fils à béton, capots, accessoires, treillis). Les opérateurs ligaturent chacun des éléments à la main ou à l'aide d'une ligatureuse.
- 2) Le coulage : lors de cette tâche, l'opérateur contrôle le béton coulé par la machine, lisse le dessus à l'aide d'un râteau, et retire le béton des zones où il ne doit pas y en avoir.
- 3) Le levage : après une nuit de séchage, les opérateurs peuvent découper les fils à béton avec une disqueuse ou une pince-monseigneur. Ils les lèvent à l'aide d'un pont roulant et les empilent afin de faciliter le stockage des pièces fabriquées.

La ligne de production est généralement semi-automatisée (ligne de production en partie automatisée avec un ou plusieurs opérateurs qui effectuent des tâches ne pouvant pas être réalisées par une machine). Les opérateurs travaillent en équipe et le rythme semble généralement facile à maintenir. De plus, les opérateurs ont été amenés à souvent se déplacer le long de la piste (120m de long pour celles observées) ou autour du carrousel.

Principales contraintes observées :

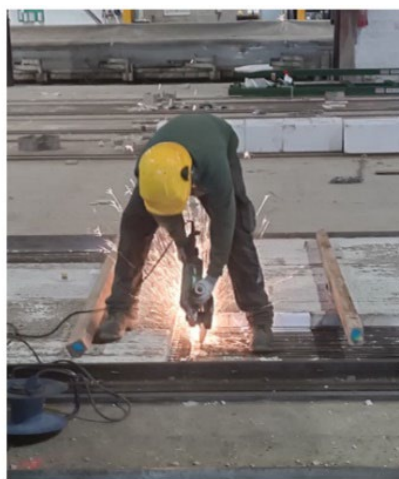
Les postures contraignantes

La posture contraignante majoritairement observée sur ce poste est due à la ligature des éléments lors de la préparation, mais aussi lors de la découpe des fils de béton pendant le levage. Dans ces deux cas, les opérateurs travaillent à forte proximité du sol provoquant des postures maintenues accroupies et/ou de flexion du tronc vers l'avant (pouvant aller au-delà de 90°). Ces postures peuvent être maintenues durant de longues périodes, comme lors de la préparation pendant laquelle la ligature des accessoires peut prendre plus d'une heure.

Il est également important d'ajouter que le port d'outil dans ces situations de travail accentue les difficultés liées à ces postures (entre 1,5kg pour les plus légers et 4kg pour les plus lourds).



Opérateur pendant une ligature



**Opérateur coupant des fils à
béton**

Autres points de vigilance :

- Nécessité de liberté de mouvement
- Abords de la piste et la piste elle-même sont huilés
- Projection de particules lors des découpes (voir image « Opérateur coupant des fils à béton »)

Conclusion : Certains exosquelettes semblent intéressants à tester dans les tâches de ligatures et de découpe. L'idée est de fournir un soutien dorsal afin de limiter les efforts lors des flexions de plus de 45° tout en permettant le maintien de ces positions. Par exemple, le Liftsuit d'Auxivo, le Bisko d'Exofair ou le Hapo d'Ergosanté.

4.8 CTMNC : Poste de technicien chantier

Objectif du poste : Tester des montages de briques lors des essais, lancement et suivi des chantiers pour les entreprises découvrant les produits.

Description de l'activité de l'opérateur : Lors de cette analyse, nous nous concentrerons sur le montage des briques réalisé lors des essais. Cette activité est réalisée en intérieur et l'opérateur est seul.

Le montage par étage (ou rang) est organisé comme suit :

- 1) L'opérateur prend les briques d'une palette ou du chariot et les pose sur une poutrelle en acier (IPN) surplombé d'une plaque métallique.
- 2) L'opérateur vérifie l'alignement à l'aide d'un niveau et rectifie si besoin grâce à un maillet.
- 3) L'opérateur humidifie les briques avec une brosse afin d'assurer la propreté des briques et une meilleure adhérence du mortier.
- 4) L'opérateur applique ensuite 2 ou 3 couches de mortier grâce à un rouleau d'étalement.

Par la suite, l'opérateur reprend à l'étape 1 pour commencer le second rang. Les essais demandent de réaliser 3 à 6 rangs. Lorsque nécessaire, l'opérateur emmène les briques pour les découper à l'aide d'une débiteuse ou manuellement à l'aide d'une scie alligator. Il les place ensuite sur un chariot.

Pour la préparation du mortier, l'opérateur travaille au sol : il vide un sac de 25kg posé sur le sol dans un bac au sol et malaxe le mélange à l'aide d'un malaxeur. L'opérateur vérifie l'homogénéisation du mortier manuellement avec une truelle.

Principales contraintes observées :

1) Port de charge

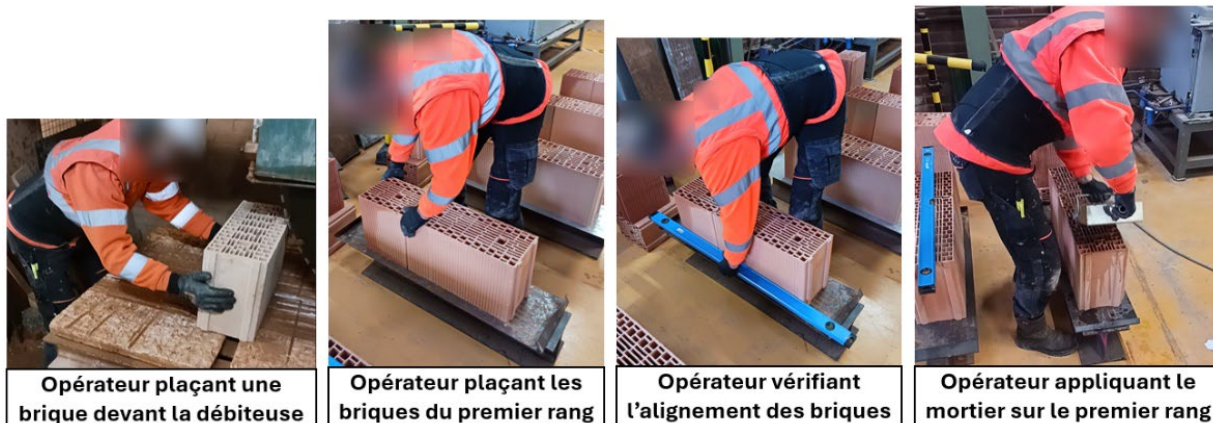
Les opérateurs manipulent les briques (environ 20kg chacune) au minimum 1 fois à 3 fois selon s'il y a découpe ou non de celles-ci. Les opérateurs portent également les sacs de mortier (25kg).

2) Postures contraignantes

Les ports de charge sont parfois contraignants au sol (fin de la palette de briques, étage inférieur du chariot, sac de mortier et bac de préparation, etc.).

Les principales postures contraignantes concernent alors les premiers rangs de montage qui entraînent une flexion du tronc vers l'avant pouvant être au-delà de 45° notamment lors de la mise en place des briques et de la vérification de l'alignement.

Lors des observations, le plan de travail de la débiteuse était également bas, demandant à l'opérateur de réaliser des flexions du tronc vers l'avant pouvant aller jusqu'à 45°.

**Autres points de vigilance :**

- Passage pouvant être exigus (peu d'espace entre les IPN).
- Prise d'appui sur le genou afin de faciliter de transvasement du sac de mortier dans le bac.

Conclusion : Certaines problématiques semblent pouvoir être corrigées par une amélioration de l'environnement de travail. Cependant, afin d'aider les manutentions et le port de charge des éléments au sol, le Cray X de German Bionic semble être intéressant à tester.

4.9 CTMNC : Poste des entailles

Objectif du poste : Découper manuellement des pierres sur mesure.

Description de l'activité de l'opérateur :

Étapes clés :

- 1) Perçage sur les parties superflues afin d'insérer la louve (outil de type pince) du pont roulant permettant de déplacer la pierre.
- 2) Traçage des lignes de découpe selon les instructions du plan de coupe.
- 3) Déplacement des pierres sur le chopin de coupe et traçage de la continuité des lignes sur l'ensemble des faces des pierres.
- 4) Découpe à la tronçonneuse et rectification avec un pilon quand nécessaire.
 - Selon les besoins de coupe, les opérateurs peuvent utiliser une tronçonneuse individuelle ou à 2 opérateurs.



Usage de la tronçonneuse individuelle



Usage de la tronçonneuse 2 opérateurs

- 5) Evacuation manuelle des rebuts dans des bacs à proximité.
- 6) Conditionnement sur palette : prise manuelle d'une plaquette, placement de paille et des pierres, cerclage manuel.

Lors des observations, les opérateurs travaillaient en binôme à un rythme facile à maintenir.

Les dimensions et le poids des produits sont très aléatoires, car ils répondent à des demandes sur-mesure des clients. Ce poste ne réalise aucune série.

Principales contraintes observées :

Port de charge :

- Le port de charge est principalement induit par le poids des tronçonneuses : allant de 25kg (tronçonneuse individuelle) à 75kg (tronçonneuse à 2 opérateurs, soit 37,5kg/opérateur). Le poids des tronçonneuses est important dans cette activité, car il permet aux opérateurs de diminuer la force nécessaire à la découpe.
- Pour la manipulation des produits, elles sont le plus souvent assurées par un pont roulant, mais il arrive que les opérateurs replacent les produits sur le pont ou sur la palette. Le poids des pierres pouvaient aller jusqu'à 25kg lors des observations.

Points de vigilance :

- Nécessité de ne pas entraver la liberté de mouvement, notamment sur les côtés.
- Présence d'une forte humidité dans les ateliers (90%).
- Les pierres sont abrasives.
- Attention découpe selon plusieurs axes : haut/bas, droite/gauche, transverse

Conclusion : L'usage d'un exosquelette est intéressant uniquement pour les tâches de découpe. Les autres tâches pouvant devenir moins contraignantes avec d'autres dispositifs (tables élévatrices, ventouses, etc.), cependant une automatisation de la ligne est impossible car le sur-mesure réalisé ne peut être assuré par machine.

Exemple d'exosquelettes à tester : le Cray X de German Bionic, l'exosquelette du projet Extrafor par Exhauss ou l'Exo-T-22 d'Hilti.

Cette étude de compatibilité révèle que les exosquelettes pourraient être envisagés dans la plupart des postes examinés. Les modèles d'exosquelettes choisis varient considérablement en fonction des besoins spécifiques des postes, offrant ainsi une assistance pour le port de charges, le soutien des bras en hauteur ou encore l'aide pour le dos. Bien que cette solution puisse être envisagée partout, l'entreprise doit d'abord s'assurer que toutes les autres mesures pertinentes pour améliorer les conditions de travail ont déjà été mises en place, si elles existent.

5 La perception des entreprises : attractivité et exosquelettes

Les résultats présentés dans cette partie sont basés sur une enquête menée auprès de 29 entreprises, offrant un aperçu des tendances observées. Chaque partenaire a pu interroger des entreprises de son secteur, pour les postes sélectionnés précédemment, en utilisant un guide d'entretien validé en concertation avec tous les partenaires. Pour cette enquête, nous avons choisi d'interroger des personnes chargées du recrutement au sein des entreprises, afin de recueillir leur avis sur l'attractivité de leur entreprise, leurs critères de recrutement ainsi que l'intérêt potentiel des exosquelettes pour faciliter le recrutement.

Les détails des informations sont disponibles en Annexe 4 (page 74) de ce rapport.

5.1 Attractivité perçue

Les entreprises du secteur de la construction interviewées se perçoivent majoritairement comme ayant une bonne attractivité (18 entreprises sur 28), bien que cela ne les empêche pas de rencontrer des difficultés de recrutement pour certains postes de travail. En revanche, huit entreprises estiment avoir une attractivité moyenne, tandis que seulement deux entreprises ont considéré avoir une mauvaise attractivité.

Les difficultés de recrutement dans certains postes de travail semblent souvent attribuées à la nature physique et contraignante des tâches. Les conditions de travail en extérieur et les déplacements fréquents peuvent également dissuader de nombreux candidats potentiels. En outre, la rareté des compétences requises sur le marché du travail restreint le nombre de candidats qualifiés disponibles.

Au cours de ces entretiens, plusieurs éléments susceptibles de nuire à l'attractivité de ces entreprises ont pu être identifiés. Tout d'abord, les conditions de travail, en particulier pour les postes considérés comme très pénibles ou ceux effectués en extérieur. La cadence de travail et le manque de modernité de l'environnement de travail ont également été mentionnés. Un second aspect concerne la notoriété des entreprises et des métiers. En effet, la réputation de certains métiers considérés comme particulièrement difficiles, ainsi que celle des entreprises, peut constituer un frein au recrutement. Ce manque de popularité entraîne une pénurie d'opérateurs formés et d'apprenants dans ces filières, rendant le recrutement plus difficile pour les entreprises et exacerbant la concurrence entre elles. En outre, un autre aspect concerne davantage l'organisation du travail, et notamment le style de management, les horaires ou la nécessité de réaliser des déplacements sur plusieurs jours. Enfin, les salaires ont été jugés parfois trop bas pour le travail demandé.

Afin de répondre à ces éléments susceptibles de nuire à l'attractivité, les entreprises cherchent à s'améliorer sur divers aspects, notamment en améliorant :

- Les environnements de travail (ressources matérielles, aides à la manutention, automatisation) ;
- La qualité de vie au travail (développement de l'esprit d'équipe, de forme de « bonne ambiance au travail ») ;
- Les salaires et avantages (rémunération, avantages sociaux, primes) ;
- L'image de l'entreprise ;
- Les conditions de travail (lutte contre la pénibilité, EPI, ambiance sonore, rythme de travail) ;
- L'organisation du travail (flexibilité horaire, polyvalence, management, communication interne) ;

- Les infrastructures (locaux fermés, propres, modernes).

Les détails de ces informations sont disponibles en Annexe 4 (page 74) de ce rapport.

Cependant, à l'avenir, ces entreprises aspirent à mettre davantage l'accent sur l'amélioration des conditions de travail tout en continuant à progresser sur les autres aspects évoqués.

5.2 Critères de recrutement de entreprises

Nous avons demandé aux entreprises de qualifier plusieurs critères de recrutement, sur une échelle allant de « critère rédhibitoire, critère non pris en compte » à « critère décisif pour le recrutement ».

Quatre critères ont été identifiés comme étant particulièrement cruciaux et souvent déterminants pour les entreprises :

- 1) La motivation du candidat à intégrer l'entreprise (pour 21 entreprises sur 27 ayant répondu).
- 2) La capacité du candidat à travailler en collaboration
- 3) Le savoir-être (autonomie, esprit d'initiative, etc)
- 4) Le salaire demandé en accord avec le marché.

Cinq autres critères ont été identifiés comme très appréciés par les entreprises, tout en n'étant pas forcément décisifs pour le recrutement :

- 1) La flexibilité du candidat (horaires, lieux de travail, etc), qui est souvent préféré, mais également décisif pour 7 entreprises. A l'inverse, pour d'autres ce critère est peu important car « *on s'adapte* » ou « *on demande peu de flexibilité aux candidats* ».
- 2) L'expérience dans un poste similaire, étant très souvent préféré, mais aussi décisif pour 4 entreprises. Pour plusieurs entreprises interrogées, l'expérience permet d'être opérationnel plus rapidement sur le poste, mais il ne s'agit pas d'un frein au recrutement.
- 3) Le savoir-faire sur certains outils ou machines qui est majoritairement préféré (pour 23 entreprises sur 28 ayant répondu). Pour plusieurs, il s'agit d'un véritable atout, mais ce critère est rarement décisif car la formation nécessaire aux outils/machines peut être faite directement dans l'entreprise.
- 4) L'expérience dans une entreprise similaire, qui est également très appréciée
- 5) Le diplôme (études, CACES, etc). Pour certaines entreprises, notamment les professions liées aux bois, la formation n'est pas toujours importante car « *de toute façon on fait une formation complète en entrée de poste* ». En effet, peu de formations existent initialement dans certaines professions comme le bardage bois.

Un autre critère de recrutement a émergé à la suite des entretiens avec les entreprises : la localisation géographique du candidat par rapport à l'entreprise. En effet, plusieurs entreprises sont excentrées des zones urbaines et recherchent des candidats résidant à proximité afin de limiter les risques de départ ultérieur pour des opportunités plus proches de leur domicile.

Enfin, nous avons pu voir que le fait de recruter un candidat plutôt jeune ou un candidat de sexe féminin, ne font généralement pas partis des critères pris en compte ou sont peu important. La plupart des entreprises ne font pas de distinctions entre les hommes et les femmes durant le recrutement. Certains n'ont même jamais envisagé de recruter des femmes,

simplement parce qu'elles n'ont jamais reçu de candidatures féminines : « *on ne s'est jamais posé la question, car on n'a jamais eu une femme qui a candidaté* ».

Pour d'autres entreprises, l'aptitude est primordiale, mais des craintes peuvent persister concernant la résistance physique des femmes pour certains postes : « *On a déjà essayé mais elles sont moins résistantes physiquement, moins solides, mais pour certains postes moins pénibles elles pourraient* » ; « *Avant il n'y en avait pas à cause de la pénibilité, mais ça s'est amélioré donc on pourrait l'envisager* ».

Pour l'une des entreprises, le recrutement d'un jeune est privilégié, notamment pour pallier le vieillissement de leur personnel. En revanche, pour d'autres, les jeunes sont moins favorisés en raison de préoccupations liées à la fidélisation, « *avec les jeunes, il y a souvent des problèmes de fidélisation* », et à leur endurance physique « *les jeunes sont moins endurants physiquement qu'avant* ».

5.3 La perception de la solution exosquelette

La quasi-totalité des entreprises interviewées est intéressée par le sujet des exosquelettes, notamment pour améliorer les conditions de travail (en général ou en aide au port de charge) ou pour prévenir les troubles musculo-squelettiques. Parmi les trois entreprises non intéressées, l'une nous a indiqué que les exosquelettes n'étaient pas utiles pour leurs postes, car ils n'étaient pas considérés comme pénibles au regard des critères de la médecine du travail. Cependant, l'utilité des exosquelettes ne se limite pas aux postes pénibles, ce qui montre des idées préconçues persistantes sur cette technologie. Également, la seconde entreprise non intéressée, nous a indiqué ne pas l'être car elle avait déjà réalisé des tests d'exosquelettes, qui n'avaient pas été concluants. Cependant, il ne faudrait pas rester sur un test négatif, car les technologies d'exosquelettes évoluent considérablement et le choix du dispositif est déterminant pour son utilité perçue et son acceptabilité. La dernière entreprise ne s'intéressait pas aux exosquelettes car elle privilégiait d'abord l'amélioration de l'environnement de travail, conforme aux recommandations favorisant les solutions collectives avant les solutions individuelles.

Par ailleurs, il est intéressant de noter que ces entreprises ont eu connaissance de la technologie exosquelette par le biais de différents vecteurs de communication : médias, réseaux sociaux, Centre Technique Industriel de référence, organismes de prévention et de santé au travail, mais aussi par leurs proches, des commerciaux ou des salons.

Aussi, les entreprises sont plutôt mitigées concernant l'impact de l'usage d'exosquelettes sur leur attractivité. En effet, seulement un tiers d'entre elles considère que cela aura un impact positif.

Enfin, plusieurs freins à la mise en place d'exosquelettes dans les entreprises ont été identifiés. Les freins principaux sont :

- La réticence des opérateurs à leur utilisation ;
- La crainte qu'ils soient incompatibles avec certaines tâches, mouvements, outils ou machines ;
- L'investissement financier requis ;
- La crainte qu'ils soient source d'inconfort pour les opérateurs ;
- L'entretien (nettoyage et maintenance).

5.4 Les exosquelettes, une aide au recrutement ?

Pour la majorité des entreprises interviewées (19/29), les exosquelettes semblent être vus comme un moyen potentiel d'élargir les profils de recrutement possibles.

Plusieurs entreprises s'accordent à dire que tout système permettant de réduire la pénibilité ne peut qu'aider. L'une des entreprises interrogées dans le secteur de la palette pense également que les exosquelettes pourraient aider à faire des rotations de poste au sein des entreprises, avec des opérateurs qui ne font pas de manutention habituellement (comme les caristes par exemple).

Parmi les entreprises interrogées par le CERIB, celles qui n'ont pas encore testé d'exosquelettes semblent ouvertes mais restent prudentes quant aux résultats qu'elles pourraient escompter. Les entreprises ayant eu l'occasion de tester un ou plusieurs exosquelettes n'ont généralement pas été satisfaites de l'expérience.

Enfin, l'ensemble des entreprises interrogées par le CTMNC et quelques autres pensent que les exosquelettes ne les aideraient pas à élargir les profils des personnes recrutées : car ils peuvent aider, mais pas au recrutement, ou encore car l'impact ne pourrait être qu'au niveau du maintien dans l'emploi.

5.4.1 Des femmes ?

En ce qui concerne l'aide au recrutement des femmes, les avis sont assez partagés en fonction des secteurs :

Globalement, 16 entreprises sur 29 pensent que les exosquelettes peuvent être un levier. Les avis sont d'autant plus prononcés pour les postes de bardage et de soudage (13 entreprises sur 15 ont un avis positif) car :

- « Une partie des efforts va être compensé par l'exosquelette »
- « Si ça peut aider au port de charge alors ça va peut-être les intéresser »
- « Le frein de base c'est le poids, donc si on enlève le problème, on pourrait recruter plus facilement » (notamment cité dans les métiers de la palette).
- « Si l'exosquelette est adapté, cela aiderait à rassurer les femmes ».

Pour 13 entreprises sur 29, l'exosquelette n'aiderait pas au recrutement car :

- Les métiers sont trop physiques et pas toujours adaptés actuellement : « Les métiers restent physiques, ce n'est pas l'exosquelette qui va tout changer » (déclaré par une entreprise du secteur des palettes). « Il faut d'abord améliorer les postes avant de trouver une solution individuelle »
- Le manque de femmes sur certains postes ne sont pas dus qu'aux problématiques physiques : « les femmes c'est un problème de société et de formation, il y a peu de femmes à recruter, ce n'est pas que la difficulté physique, il y a aussi les conditions météo qui sont dures pour elles » ; « Je ne pense pas que ce qui freine c'est que le physique, c'est surtout l'isolement dans un milieu masculin, il faut avoir du caractère pour » (déclaré par une entreprise du secteur de la construction bois – pose de bardage, mur ossature bois).

- Les exosquelettes ne sont pas toujours utiles : *« Exemple d'application : 1 opérateur (homme) a porté un exosquelette qui l'a aidé dans ses tâches. 2 opératrices, sur le même poste, ont également porté le même exosquelette. Le résultat n'a pas été positif pour ces dernières car elles faisaient naturellement des gestes métier optimisés et n'avaient pas besoin de l'exosquelette. L'exosquelette s'avérait même être une contrainte pour ces dernières. Ils ne sont pas adaptés à toutes les femmes »*

5.4.2 Des jeunes ?

En ce qui concerne l'aide au recrutement des jeunes, les avis sont très partagés dans l'ensemble des secteurs.

Pour 12 entreprises sur 29, il s'agirait d'un levier car :

- Les exosquelettes aident à prendre soin de leur santé
 - o *« Ils n'ont pas envie de s'abîmer »*
 - o *« Ça donne l'image de « je prends soin de mon corps, je serais moins usé »*
 - o *« Les jeunes souffrent de plus en plus tôt du dos »*
- Les exosquelettes donnent une image de nouveauté, de technologie et de modernité
 - o *« Les jeunes aiment la nouveauté »*
 - o *« Ils aiment la nouveauté, les matériels considérés comme innovants ».*
 - o *« Ils sont connectés, donc si on incorpore de la technologie ça va les intéresser ».*
 - o *« Ça donne une image très professionnelle et moderne, ça pourrait redorer l'image de l'industrie »*

A l'inverse, pour 14 entreprises sur 29, les exosquelettes n'aideraient pas car :

- Les jeunes sont « en forme » et ont un manque de perspective sur leur utilisation :
 - o *« Ils sont frais, ils supportent mieux la pénibilité et ne se rendent pas compte que ça pourrait leur servir »*
 - o *« Quand t'es jeune t'es tout feu tout flamme, ce n'est pas sûr que ce soit une priorité pour eux »*
 - o *« Ils n'ont pas beaucoup la tête sur les épaules, ils ne vont pas évaluer l'intérêt pour eux »*
 - o *« Le jeune n'aura peut-être pas encore de pathologie et ne connaîtra peut-être pas les contraintes du poste. »*
- Ce n'est pas leur priorité : *« Ceux qu'on embauche ils ne cherchent pas ces choses, ils ont juste le besoin d'avoir un salaire à la fin du mois, ça ne va pas changer leur motivation de base ».*
- Ce n'est pas intéressant si l'entreprise ne s'inscrit pas dans une démarche globale. L'aide dépendra également de la culture de prévention au travail au sein de l'entreprise, qui n'est pas toujours mise en avant ou recherchée par les entrants.
- Ces équipements sont *« peu connus par les jeunes ».*

- Ces équipements seront vus comme une contrainte : « *La génération actuelle accepte moins aisément les contraintes et les exosquelettes représentent une certaine contrainte.* » (1 avis)
- Les exosquelettes peuvent donner une mauvaise image du poste : « *Je ne suis pas certaine que l'exosquelette donne une « bonne image » du poste... il peut à mon sens donner l'image d'un poste pénible.* » (1 avis)

5.4.3 Des seniors et/ou personnes avec fragilités physiques ?

En ce qui concerne l'aide au maintien dans l'emploi et au recrutement de personnes seniors et/ou avec des fragilités physiques, les avis vont dans le même sens :

L'exosquelette semble être un levier pour la majorité des entreprises :

- Car ils aident à réduire la pénibilité, les TMS, prévenir les douleurs, soulager le port de charge
- « *Certains ont beaucoup de mal si on leur trouve des postes adaptés à leurs limites physiques, ils sont attachés à leurs métiers, mais là ça pourrait les aider* ».
- « *Cela peut être un plus* »

Seules les entreprises dans le secteur de la palette, ne semblent pas être du même avis (pour 4 entreprises sur 5) car :

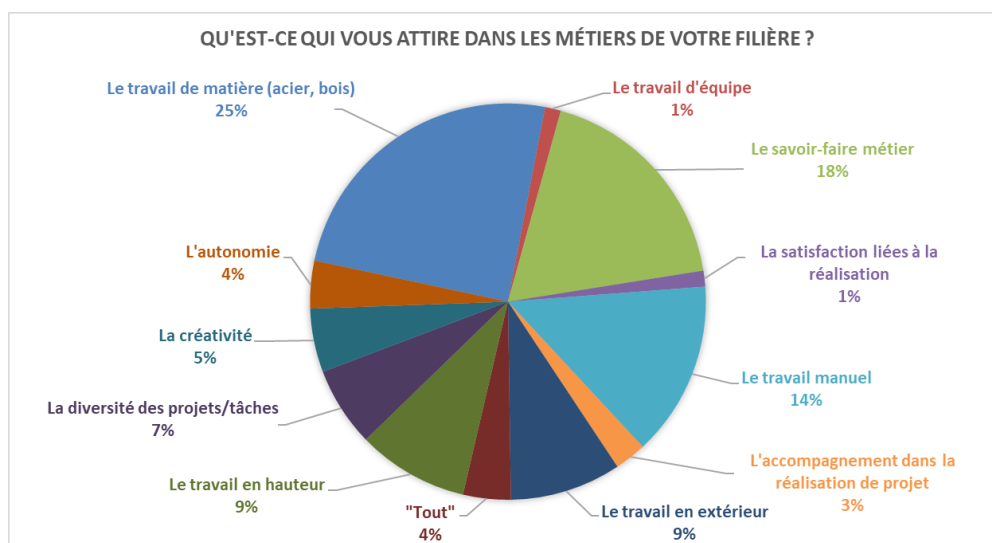
- L'exosquelette n'aidera pas si la personne a déjà des limites physiques
- L'exosquelette ne supprime pas les efforts donc « *S'ils ont déjà des problèmes, je ne suis pas sûr que ce soit bien* »

6 La perception des apprenants : attractivité et exosquelettes

Afin d'évaluer l'impact potentiel des exosquelettes sur l'attractivité des métiers de la construction, nous avons mené une enquête auprès de 47 apprenants d'un centre de formation d'apprentis (CFA). Les participants étaient issus des filières de métallerie, de maçonnerie, de menuiserie fabricant, de charpenterie bois et de couverture. Leur âge variait entre 15 et 28 ans, avec une moyenne de 17,5 ans, et la majorité étaient des hommes (94%).

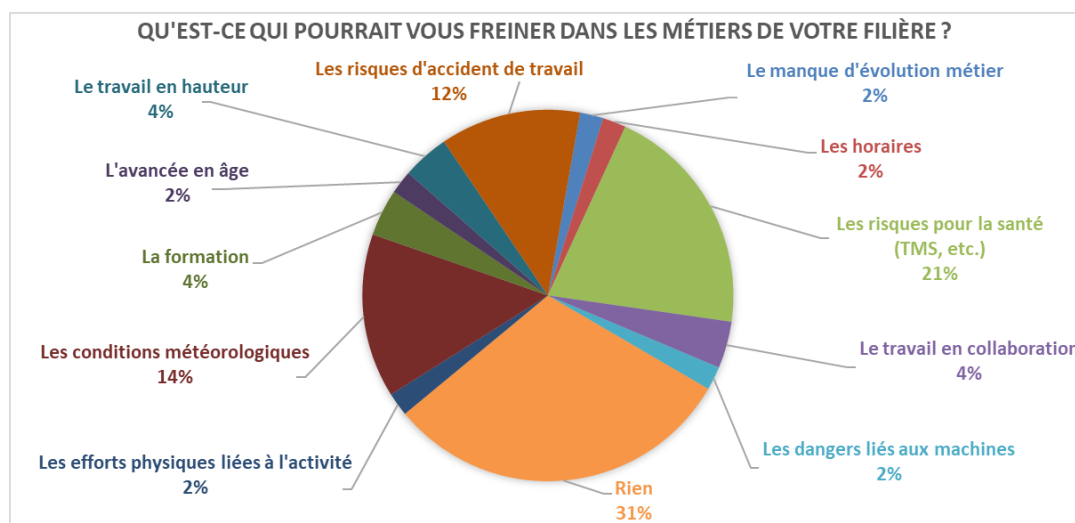
6.1 Attractivité des métiers

Lorsqu'on interroge les apprenants sur ce qui les attire dans leurs métiers respectifs, plusieurs facteurs ressortent :



Ces éléments montrent que les jeunes sont principalement attirés par l'aspect concret et technique de ces métiers, ainsi que par l'environnement de travail dynamique et varié.

Malgré ces attraits, plusieurs freins significatifs subsistent :



Les freins cités par les apprenants sont similaires aux éléments entraînant des difficultés de recrutement identifiées par les entreprises interviewées dans la partie précédente. De plus, les troubles musculo-squelettiques (TMS) et les accidents de travail représentent des préoccupations majeures, soulignant la nécessité de solutions pour améliorer la sécurité et la santé des travailleurs.

6.2 La perception de la solution exosquelette

Concernant le sujet des exosquelettes, l'étude a révélé que 66% de ces apprenants avaient déjà entendu parler de cette technologie, mais que seuls 13% d'entre eux en avaient déjà vu et qu'aucun n'en avait encore testé. Bien que les entreprises utilisant des exosquelettes renvoient une image positive (51%) ou neutre (45%) aux apprenants, cela n'augmente pas significativement leur intérêt pour ces entreprises. En effet, 72 % des apprenants témoignent d'un intérêt similaire pour les entreprises, qu'elles aient, ou non, recours à ces technologies. Toutefois, 70% des apprenants se disent prêts à les tester, seul un seul apprenant s'y oppose.

Parmi les apprenants qui étaient moins intéressés par les entreprises ayant des exosquelettes, la majorité pensent ne pas en avoir besoin ou craignent de perdre du muscle ou de la force, ce qui est une idée reçue, tandis qu'une minorité s'inquiète qu'on puisse leur imposer. Ces réticences font écho à certains retours des entreprises interviewées sur ce sujet, notamment celles pensant que les exosquelettes n'aideraient pas à l'attractivité.

À l'inverse, les apprenants plus intéressés par les entreprises utilisant des exosquelettes perçoivent que ces entreprises s'intéressent aux conditions de travail et sont innovantes, comme le pressentaient les entreprises interviewées dans la partie précédente. Cependant, certaines idées reçues persistent, comme la croyance que le travail sera plus facile et qu'ils deviendront plus forts.

Finalement, les exosquelettes possèdent un potentiel certain pour rendre les métiers de la construction plus attractifs, en répondant aux préoccupations majeures des jeunes apprenants concernant les risques professionnels et les conditions de travail. Leur adoption par les entreprises pourrait non seulement améliorer l'image de celles-ci, mais aussi attirer et fidéliser de nouveaux talents en mettant l'accent sur l'innovation et le bien-être des employés. Toutefois, les études menées dans le cadre du projet EXATTRAC ont montré qu'il est essentiel de poursuivre les efforts de sensibilisation et de formation pour démystifier les idées reçues et maximiser l'acceptation et l'intérêt pour cette technologie.

7 Conclusion

Les métiers de manutention des secteurs de la construction sont touchés par de nombreux facteurs de pénibilité tels que les contraintes physiques marquées, les environnements physiques agressifs ou encore les rythmes de travail particuliers. Par conséquent, les enjeux de l'amélioration des conditions de travail sont multiples, allant de la réduction des facteurs de pénibilité et la prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) à la baisse des arrêts maladies. Cette étude nous aura également prouvé que les conditions de travail contraignantes étaient reconnues comme un obstacle à l'attractivité de ces métiers.

Dans un contexte où le recrutement est souvent difficile et où les contraintes physiques sont souvent importantes, il était intéressant de se demander si les exosquelettes pouvaient avoir un impact positif sur ces métiers. En effet, la quasi-totalité des entreprises interviewées sont intéressées par le sujet des exosquelettes dans le but d'améliorer les conditions de travail ou de prévenir les TMS. De plus, pour la majorité des entreprises interrogées, les exosquelettes sont perçus comme un moyen potentiel d'élargir les profils de recrutement possibles. Pour autant, les avis sont parfois mitigés en fonction des profils :

- Pour une partie des jeunes, le recours aux exosquelettes dans les entreprises semble valoriser leur image. Ces entreprises sont perçues comme attentives aux conditions de travail et innovantes, ce qui accroît l'intérêt de plusieurs apprenants. Cependant, certains apprenants ne sont pas davantage intéressés par ces entreprises, car ils estiment ne pas en avoir le besoin. Cela rejoint le point de vue de certaines entreprises qui considèrent que les jeunes, étant en bonne forme physique, supportent mieux la pénibilité du travail et ne réalisent pas que les exosquelettes pourraient leur être utile.
- Pour les femmes, l'exosquelette est perçu comme une grande aide pour une partie des entreprises car, « *le frein de base, c'est le poids* », mais pour d'autres, le manque de féminisation des postes n'est pas seulement lié aux conditions de travail, mais à un problème de société.
- Pour les personnes avec des fragilités physiques, les avis sont unanimes : l'exosquelette aiderait ces personnes.

Plus largement, plusieurs entreprises s'accordent à dire que tout système permettant de réduire la pénibilité ne peut qu'être bénéfique. Leur impact sur l'attractivité pourrait davantage se faire ressentir à travers la fidélisation des employés, le maintien dans l'emploi et l'image qu'ils ont de l'entreprise. Les exosquelettes pourraient donc contribuer à améliorer non seulement les conditions de travail, mais aussi la qualité de vie au travail et potentiellement l'image de l'entreprise.

Enfin, pour conforter les entreprises de l'intérêt pour l'attractivité des exosquelettes, il serait pertinent d'approfondir le sujet en expérimentant l'intégration des exosquelettes dans les postes identifiés dans ce projet. Cela permettrait d'évaluer leur effet sur la pénibilité, les obstacles potentiels liés à ces métiers et l'impact sur la valorisation de l'image des métiers à la suite des expérimentations.

8 Annexes

8.1 Annexe 1 : Benchmark sur les exosquelettes

Ce benchmark, daté de 2023, offre un aperçu des différentes typologies d'exosquelettes disponibles sur le marché à travers le monde. Bien qu'il ne soit pas exhaustif, il permet de mieux comprendre les solutions existantes dans le secteur industriel.

Il est constitué des catégories suivantes :

- Exosquelettes pour le tronc (page 43)
- Exosquelettes pour les bras en hauteur (page 48)
- Exosquelettes pour les cervicales (page 54)
- Exosquelette pour les membres inférieurs (page 55)
- Exosquelettes pour la manutention manuelle de charge (page 56)
- Exosquelettes pour le port d'outils (page 60)
- Exosquelettes pour les mains (page 62)

Dans chaque catégorie, les exosquelettes ont été classés par ordre alphabétique.

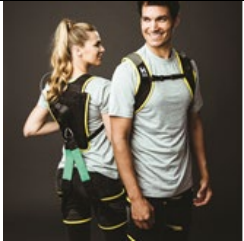
Les éléments décrits pour chaque exosquelette sont :

- Le descriptif de l'exosquelette (son nom, et si possible le nom du fabricant ou du distributeur, le lieu de fabrication et le site web)
- La catégorie de l'exosquelette (exosquelette actif ou passif, la zone soulagée).
- L'image de l'exosquelette.
- Lorsque nous avons l'information de disponible, nous avons également indiqué :
 - Le prix
 - Les autres informations (comme le poids, les tailles disponibles)
- Des éléments de retour d'expérience (points de vigilance, points positifs), issus de l'étude de l'OPPBTP¹¹

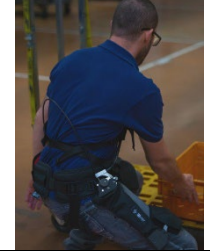
¹¹ Girardot P. (2023). Exosquelettes, dispositifs d'assistance physique : 50 modèles à la loupe ! https://www.preventionbtp.fr/actualites/risques/exosquelettes-dispositifs-d-assistance-physique-50-modeles-a-la-loupe_UXDWVx8h8XELCdAehV3XQH

8.1.1 Exosquelettes pour le tronc

<i>Nom de l'exosquelette Fabricant</i>	<i>Type d'exosquelette</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Prix</i>	<i>Retour d'expérience OPPBTP</i>	<i>Images</i>
Auxivo-Liftsuit (CH) https://www.auxivo.com/	Exosquelette passif Fonctionne avec des élastiques Assistance du dos pour les soulèvements répétés à partir du niveau inférieur de la hanche, pour le travail nécessitant la position buste penchée en avant	0.9 kg Deux tailles : S/M et L/XL	950€	Points de vigilance : - Confort en lien avec la surface corporelle couverte ; - Positionnement sous/sur vêtements de travail.	
Corfor – modèle V2 Confort harnais (FR) https://www.corfor.fr/	Exosquelette passif Sous-vêtement supplétif Assistance à effet ressort jusqu'à 12 kg	Poids < 0.5kg Plusieurs tailles et couleurs		Points de vigilance : Points de frottement (notamment aux membres inférieurs).	
Ergosanté - Hapo (Harnais de posture) (FR) https://ergosante.fr/	Exosquelette Passif Assistance physique, lorsque le dos forme un angle supérieur à 5 ou 20°. Rediriger les efforts du haut du tronc (appui pectoral) vers les cuisses à l'aide des ressorts.	1.2 kg Déverrouillage en 1 clic Plusieurs tailles		En flexion dynamique, celui-ci permet, de la position mains au sol jusqu'à la position bras à hauteur (au niveau des hanches), d'assister le bas du dos. La ceinture permet, quant à elle, un maintien sans contention des lombaires.	
ExoAtlet – ExoAtlant (LU) https://exoatlet.lu	Exosquelette passif de levage et de transport. Réduction de la charge sur la colonne vertébrale (réduction du couple au niveau des segments L5, S1).	Compense jusqu'à 15kg			

Exofair- Bisko (FR) https://exofair.eu/	Exosquelette passif Monogabarit (entre 165 et 190 cm) Fonctionne avec des élastomères Assistance du dos pour les tâches de levage ou des postures contraignantes comme le dos penché Réduction de 40% du poids ressenti	0.71 kg	950 € HT		
Herowear – Modèle Apex (US) https://herowearexo.com/	Exosquelette passif Exosquelette textile, mais avec dispositif d'assistance élastique débrayable. Aide au maintien de la posture en flexion du tronc, assistance au redressement.	1,5kg	1,199\$		
hTRIUS GmbH – BionicBack (DE) https://www.htrius.com/	Exosquelette passif de support dorsal. En mode dynamique, le système fournit une force d'appui proportionnelle à l'angle de flexion de la hanche, tandis qu'en mode statique, il permet à l'utilisateur de s'appuyer et de se reposer sur l'appareil à des angles prédéfinis	1,3kg			
Hunic – SoftExo Carry (DE) https://hunic.com/	Exosquelette passif SoftExo Carry aide au port de charges nécessitant simultanément une liberté de mouvement maximale	Taille unique, réglable.		Points de vigilance : - Points de frottement ; - Facilité de mise en place.	
Hunic – SoftExo Hold (DE) https://hunic.com/	Le SoftExo Hold fournit un soutien pour les activités où vous êtes dans une posture forcée, comme le travail de rassemblement ou debout.				

Hunic- SoftExo lift (DE) https://hunic.com/	Le SoftExo Lift fournit un soutien lorsque la puissance est soulevée en dessous de la hauteur de la poitrine ou pendant les mouvements de levage en se pliant, par exemple à partir de boîtes en treillis ou d'étagères.				
Innophys – Modèle Every (JP) https://innophys.jp/en/	Technologie hybride entre structure rigide et textile. Exosquelette passif Assistance au retour de flexion du tronc : aide au redressement depuis une position tronc fléchi en avant.	3,8 kg Taille unique Assistance à mécanisme hydraulique (compression d'air + pompe).	Inférieur à 2200 € HT		
Japet (FR) https://www.japet.eu/	Exosquelette actif d'assistance aux efforts de la région lombaire. Système de décompression axiale lors des efforts.	2kg			
Kinetic Edge – Flexlift (US) https://kineticedgeinc.com/	Exosquelette passif « Exosuit » : exosquelette textile d'assistance aux efforts de la région lombaire. L'assistance porte sur le dos et les hanches (mouvements de type « squat »)	Taille unique		Points de vigilance : - Points de frottement ; - Facilité de mise en place.	

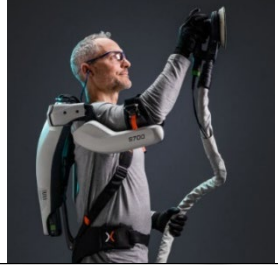
Laevo Flex (NL) https://www.laevo-exoskeletons.com/	Exosquelette passif - Assistance au retour de flexion du tronc ; non débrayable, davantage destiné aux activités dynamiques. Effort en traction sur le tronc plutôt qu'en appui thoracique.	Gilets interchangeables Versions H/F		Points de vigilance : - Encombrement latéral (hanches) ; - Peu compatible avec la conduite d'un engin.	
Laevo V2 (NL) https://www.laevo-exoskeletons.com/	Exosquelette passif Assistance au retour de flexion du tronc et aide au maintien d'une posture en flexion du tronc.	Poids : 3 kg Taille unique			
HMT – Modèle wave (FR) https://hmt-france.com/	Exosquelette passif Assistance au retour de flexion du tronc : aide au maintien d'une posture en flexion du tronc et au redressement depuis une position tronc fléchi en avant.	Poids : 1,9 kg.			
Ottobock – modèle back X (DE) https://paexo.com/	Exosquelette passif Réduction de 60% la charge exercée sur le bas du dos et compense jusqu'à 15kg de la charge. Grande liberté de mouvement				

Ottobock – modèle Paexo – Soft back (DE) https://paexo.com/	Exosquelette passif Assistance au retour de flexion du tronc : aide au redressement depuis une position tronc fléchi en avant et aide au maintien d'une posture en flexion antérieure du tronc	Poids : 3,9 kg Taille S à 3XL	295,99 €	Points de vigilance : - Encombrement (latéral et postérieur) ; - Poids, inconfort d'(US)ge (frottements notamment aux aisselles, évoqués par utilisateurs) ; - Solidité du dispositif de commande.	
Percko – modèle Lyne pro (FR) https://pro.percko.com/	Gilet intégrant des dispositifs élastiques stimulant une position « dos droit » en agissant par rappel proprioceptif plus que par assistance au redressement.			Points de vigilance : Confort en ambiances thermiques chaudes.	
RB3D – modèle Exoback (FR) https://www.rb3d.com/fr/	Exosquelette actif, d'assistance aux efforts de la région lombaire, notamment dans les manutentions manuelles.	8,4 kg 2 tailles		Points de vigilance : - Retour sur investissement ; - Impact sur les EPI (tenues HV).	
RB3D – modèle Exoviti (FR) https://www.exoviti.fr/	Exosquelette passif conçu pour soulager les lombaires lors de tâches nécessitant de rester penché en avant. Le flexion en avant du tronc comprimera 2 ressorts qui assisteront les muscles dorsaux				

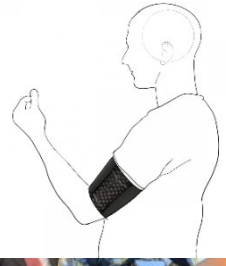
8.1.2 Exosquelette pour les bras en hauteur

<i>Nom de l'exosquelette Fabricant</i>	<i>Type d'exosquelette</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Prix</i>	<i>Retour d'expérience OPPBT</i>	<i>Images</i>
Agade – Agadexo Shoulder (IT) https://agade-exoskeletons.com/	Exosquelette actif d'assistance aux effort des membres supérieurs lors de tâches de manutention manuelle rapides et dynamiques. Utilisation de bracelets sans fil pour détecter les charges, ce qui permet d'alterner entre deux modes : mode transparent et mode d'assistance.	4kg 20h d'autonomie		Interface homme-machine via une application mobile	
Comau Robotics – modèle Mate-XT 4.0 (IT) https://comaurobotics.fr/	Exosquelette passif - Assistance aux membres supérieurs Barre dans le dos Exosquelette muni d'une glissière horizontale dans le dos pour les mouvements de l'épaule (avantage si environnement restreint). NB : Une nouvelle version intègre des capteurs permettant une analyse ultérieure de l'activité (+ batterie pour alimenter les capteurs, mais sans motorisation de l'assistance).	2,9kg		Points de vigilance : - Système de réglage de l'assistance avec une clé (allen) non intégrée à l'exosquelette ; - Plaque dorsale : maintien (relatif) de l'axe du tronc, mais sa rigidité gêne certains mouvements.	

Eksobionics – Modèle Evo (US) https://eksobionics.com/	Exosquelette passif d'assistance aux efforts des membres supérieurs, destiné aux travaux « bras en hauteur ». Sans bretelles pour le maintien, celui-ci repose principalement sur la rigidité des montants postérieurs.	Poids : 3,4 kg 4 tailles.		Assistance désactivable ; réglages des niveaux de force (2 à 7 kg par bras) et de l'amplitude de démarrage de l'assistance (15°, 25°, 35°).	
ExoRise – X-Rise (RU) https://exorise.com/	Exosquelette passif pour les tâches continues ou répétitives au niveau de la poitrine ou au-dessus. Transfert du poids des épaules sur les hanches de l'utilisateur.	Entre 2kg et 3kg Force de réaction de 0,5kg à 6kg			
Ergosanté – Hapo MS (FR) https://ergosante.fr/	Soulagement des épaules et des coudes par l'interface double Amplitude des mouvements avec assistance : jusqu'à 135° en hauteur, jusqu'à 180° à l'horizontal Assistance jusqu'à 6kg	1,3kg Taille unique		50 sec mise en place, 20 sec pour l'enlever	
Ergosanté – modèle Shiva Exo (FR) https://ergosante.fr/	Exosquelette passif : « Combinaison » d'une assistance au retour de flexion du tronc avec une assistance, débrayable, aux membres supérieurs. Assistance par retour élastique des montants (fibre de verre). Plages d'amplitude d'assistance aux membres supérieurs différentes selon types de travaux..			Points de vigilance : - Encombrement important postérieur et latéral. - Développé pour un usage en environnement industriel (SNCF), pas de retour d'expérience en secteur BTP.	

Exo-iQ – Modèle Shulter Exokelett S700 (DE) https://www.exoiq.com/	Exosquelette actif d'assistance aux épaules pour travaux « bras en hauteur ». Action pneumatique donnée pour une assistance équivalente à 5 kg de force par bras.	6,5 kg batterie comprise.			
Festool - ExoActive EX 18 (FR) https://www.festool.fr/produits/exosquelette/exosquelette-exoactive/577339---exo-18-hpc-4,0-i-plus,	Exosquelette actif d'assistance aux épaules pour travaux « bras en hauteur ». Activation possible d'un seul bras Assistance de 5kg par bras				
Hilti – Modèle Exo S (FR) https://www.hilti.fr	Exosquelette passif d'assistance aux efforts des membres supérieurs, destiné aux travaux « bras en hauteur ». Maintien d'une posture de bras en élévation et assistance au port d'outils légers (électroportatif, ≈ 4 kg / bras).	1,9kg 2 tailles (normal et large)	1800€	Points de vigilance : Fiabilité (des pièces amovibles déterminantes pour le fonctionnement de l'équipement). Niveau d'assistance réglable sur 2 gammes d'assistance. Appui-nuque réglable et amovible	
Innophys – Muscle Upper (JP) https://innophys.jp/en/	Exosquelette passif motorisé. Aide les mouvements des bras et du dos jusqu'à 35,7kg de force d'assistance. Le moteur fonctionne à l'aide d'air comprimé.	8,1 kg			

Ottobock – Paexo shoulder (Hilti – Exo 01) (DE) https://paexo.com/?lang=fr	Exosquelette passif d'assistance aux efforts des membres supérieurs, destiné aux travaux « bras en hauteur ». Maintien d'une posture de bras en élévation et assistance au port d'outils légers (électroportatif, ≈ 4 kg / bras).			Les deux modèles Ottobock et Hilti sont identiques. La fabrication et la distribution pour le secteur du BTP sont dévolues à Hilti.	
HMT – Light (FR) https://www.hmt-france.com/	Manutentions répétitives Aide à supporter le poids des bras	2 kg			
HMT – Modèle PLUM (FR) https://www.hmt-france.com/	Exosquelette passif - Assistance aux membres supérieurs destinée aux travaux « bras en hauteur ». Maintien d'une posture de bras en élévation et assistance au port d'outils de poids modéré (électroportatif, < 6 kg / bras).	1,6 kg			
Levitate – AirFrame (US) www.levitatetech.com	Exosquelette passif - Assistance aux membres supérieurs. Support dorsal rigide reliant les ceintures lombaire et scapulaire avec appui dorsal au niveau des omoplates.				

Ottobock – Paexo Cool Sleeve (DE) Paexo Cool Sleeve.Ottobock	Refroidissement des bras pour travailler plus confortable avec un exosquelette même durant les périodes chaudes.	4 tailles Lavable		Le refroidissement jusqu'à 12° Celsius dure jusqu'à 10 heures	
Robomate – Modèle Active Arms (prototype) (CH) https://www.robo-mate.eu/	Exosquelette actif d'assistance aux membres supérieurs. Orienté vers la manutention manuelle de charges.				
Robomate – Modèle Passive Arms (CH) https://www.robo-mate.eu/	Exosquelette passif, assistance aux membres supérieurs Techno : ressort et polygone	3,7 kg par bras		Compensation 7,5 kg / bras.	
Skelex – Modèle Skelex 360 – XFR (NL) https://www.skelex.com/	Exosquelette passif d'assistance aux efforts des membres supérieurs, destiné aux travaux « bras en hauteur ». Assistance reposant sur l'élasticité de lames déformables, assistance limitée à 5 kg par bras ; deux gammes d'amplitude d'assistance. Assistance d'une grande progressivité.	2,5 kg – Taille unique, réglages multiples.		Point de vigilance : Encombrement postérieur important (lames) susceptible de limiter l'accès et l'évolution dans certains espaces de travail.	

SuitX – Shoulder X (US) https://www.suitx.com/	Exosquelette passif. Il permet d'équilibrer le poids des bras et des outils tout en permet une amplitude mouvement. Propose différents niveaux de soutien	3kg		Possibilité de le combiné avec le BackX. Peut être porter avec un harnais de sécurité et une ceinture à outil.	
--	--	------------	--	--	---

8.1.3 Exosquelettes pour les cervicales

Nom de l'exosquelette Fabricant	Type d'exosquelette	Caractéristiques	Prix	Retour d'expérience OPPBTP	Images
HMT – Modèle Moon (FR) https://www.hmt-france.com/	Dispositif dynamique de soutien cervical sur harnais, fermeture par devant. Assistance par résistance de deux arceaux déformables en arrière.	0,25 kg.			
Ottobock – Modèle Paexo Neck (DE) Paexo Neck - Ottobock Bionic Exoskeletons	Dispositif de soutien cervical réglable. Propose un appui progressif à l'arrière de la tête dans les positions en extension du rachis cervical. Sans harnais, 2 sangles réglables viennent pincer en avant la ceinture.			Compatible avec Paexo Shoulder et Ottobock Shoulder (voir le passage Assistance aux efforts des membres supérieurs).	
Skelex – Support de nuque (NL) https://www.skelex.com/	Dispositif de soutien cervical, propose un appui progressif à l'arrière de la tête dans les positions en extension du rachis cervical (> 40°) (situations de travail orientant le regard vers le haut).			Sans harnais, deux sangles réglables viennent pincer en avant la ceinture. Compatible (assemblable) + exosquelette Skelex 360	
Viz-O – Modèle Viz –O (FR) https://viz-o.com/	Système dynamique de soutien cervical. Sur harnais, s'enfile comme un sac à dos. Destiné aux activités imposant une extension cervicale prolongée en lien avec l'orientation du regard vers le haut.				

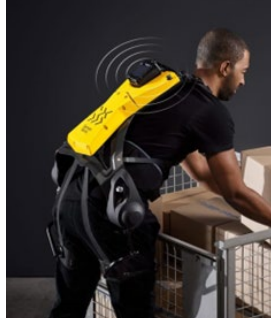
8.1.4 Exosquelettes pour les membres inférieurs

Nom de l'exosquelette Fabricant	Type d'exosquelette	Caractéristiques	Prix	Retour d'expérience OPPBT	Images
Archelis (JP) https://www.archelis.com/	Exosquelette passif qui permet un soutien en position assis-debout. 3 modes : - Libre (marche), - Archelis (marche et soutien du corps avec genoux légèrement pliés) - Debout (soutient du corps en position debout)	Entre 2kg et 3kg			
Noone – modèle Chairless Chair (DE) www.noonee.com	Il permet un soutien en position assis-debout (hauteurs réglables). Le système permet la marche et se verrouille seul lorsque l'opérateur va vers une position assise. La hauteur d'assise est réglable.				
SuitX – Modèle LegX (US) https://www.suitx.com/	Le système comprend deux modes, indépendants ou combinés : - Un mode dit « intelligent » d'assistance à la flexion – extension des genoux : le système est inactif lors de la marche ou dans les escaliers ; il s'enclenche automatiquement lorsque l'utilisateur s'accroupit en transférant une partie de son poids, au-delà du genou, vers le sol. Dans ce mode, l'utilisateur est assisté à la descente comme à la montée. - Un mode verrouillé : l'exosquelette peut être utilisé comme une chaise qui peut être ajustée à plusieurs hauteurs.				

8.1.5 Exosquelettes pour la manutention manuelle de charge

Nom de l'exosquelette Fabricant	Type d'exosquelette	Caractéristiques	Prix	Retour d'expérience OPPBTP	Images
Auxivo – Carrysuit (CH) https://www.auxivo.com/	Exosquelette passif, d'assistance aux manutentions. Une structure rigide dorsale repose sur une ceinture ventrale reportant l'appui sur le bassin. La charge à manutentionner est accrochée avec des sangles (+ crochets) reliées à la structure dorsale.				
Cyber Human – Exoarms (ES) https://www.cyberhs.eu	Exosquelette passif. Assistance bras et soutien lombaire. Soutient les mouvements pour soulever des charges, maintenir des postures de travail statiques ou transférer des charges. Aide au maintien du port de charge et au port de charge.	1,2kg Soutient entre 5kg et 10kg Maintient entre 7kg et 15kg avec 3 élastomères interchangeables			
Cyber Human – Exoshoulder (ES) https://www.cyberhs.eu	Exosquelette actif. Fournit un soutien aux bras de l'opérateur, l'aidant à maintenir des postures appropriées et à alléger les charges lors de l'exécution de tâches répétitives avec les membres supérieurs en position surélevée.	3kg Soutient entre 3kg et 12kg			

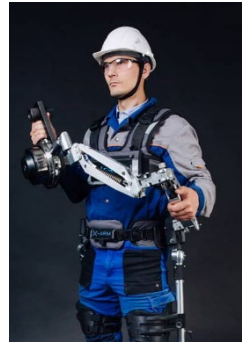
Cyber Human – Exosoft (ES) https://www.cyberhs.eu	Exosquelette passif. Il possède des "muscles artificiels" constitués d'élastomères à déformation variable qui soutiennent la personne dans l'exécution de tout mouvement dans lequel le bas du dos est compromis.	0,8kg Appui variable entre 7kg et 15kg avec 3 élastomères interchangeables			
Cyber Human – Exowaist (ES) https://www.cyberhs.eu	Exosquelette actif. Aide l'opérateur à soulever des charges lourdes, à soutenir des postures exigeantes ou à effectuer des mouvements lombaires répétitifs.	3,5kg Aide lors du port de charge de 5kg à 15kg			
Exhauss – modèles exhauss picker (FR) https://www.exhauss.com/	À la différence des autres gammes Exhauss, l'assistance est progressive (faible ou nulle les bras baissés, elle augmente jusqu'à un maximum préréglé sur une amplitude donnée ; même principe que les autres exosquelettes d'assistance aux membres supérieurs).	3,5 kg.		Même polyvalence que les autres gammes (réglages, accessoires selon le type de tâches à réaliser). Orienté comme les autres gammes sur des tâches de manutention, avec un niveau d'assistance plus mesuré que les gammes précédentes	
Exhauss – modèles exhauss stronger (FR) https://www.exhauss.com/	Exosquelette modulable (un support permet l'adaptation d'une gamme d'accessoires). Il intègre un appui nuque et repose sur une structure dorsale rigide reliant ceintures lombaire et scapulaire. Les montants passent au-dessus des épaules. Plutôt orienté vers la manutention manuelle de charges et déplacements sous charge.	5 à 6 kg.		Points de vigilance : - Correspond essentiellement à des tâches de manutention plus que de maintien postural ; - Poids significatif.	

Exhauss – modèles exhauss sxtm (FR) https://www.exhauss.com/	L'assistance repose sur un assemblage de différentes technologies (tenseurs latex, vérins azote, ressorts, etc.). L'assistance permet la manutention de charges de poids significatif, pris en charge dans sa plus grande partie. Assistance isoélastique : l'objectif est de délivrer la même assistance sur toute la course du mouvement			Comme les autres gammes, un support rigide dorsal vient supporter différents accessoires selon les tâches envisagées.	
Exomys – Atlas (AT) https://www.exomys.com/	Exosquelette passif. Aide les opérateurs à transporter jusqu'à 25kg sur de longues distances. Il réduit de 60% l'activité EMG de l'épine dorsale lors du transport d'un objet de 25kg.	2,3kg			
German Bionic – Modèle Cray X (DE) www.germanbionic.com	Exosquelette actif, d'assistance aux efforts de la région lombaire, notamment dans les manutentions manuelles. Système « intelligent » : le dispositif recueille des données sur l'activité, il prévient l'opérateur lorsqu'il détecte une situation de contrainte importante : adéquation entre son encombrement et l'espace disponible ; modification du schéma corporel.	7 kg			
Hunic – Softexo lift (DE) https://hunic.com/	Le SoftExo Lift fournit un soutien lorsque la puissance est soulevée en dessous de la hauteur de la poitrine ou pendant les mouvements de levage en se pliant, par exemple à partir de boîtes en treillis ou d'étagères.			Points de vigilance : - Points de frottement - Facilité de mise en place	

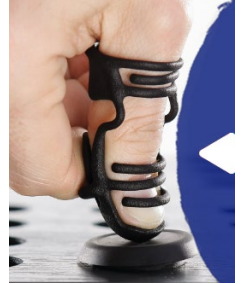
Innophys – Modèle Every (JP) https://innophys.jp/en/	Technologie hybride entre structure rigide et textile. Exosquelette passif - Assistance au retour de flexion du tronc : aide au redressement depuis une position tronc fléchi en avant.	3,8 kg - Taille unique.	2200 € HT	Assistance à mécanisme hydraulique (compression d'air + pompe).	
RB3D – modèle Exoback (FR) https://www.rb3d.com/fr/exosquelettes/exoback	Exosquelette actif, d'assistance aux efforts de la région lombaire, notamment dans les manutentions manuelles.	8,4 kg – 2 tailles.		Points de vigilance : - Retour sur investissement ; - Impact sur les EPI (tenues HV).	
Robomate – modèle Active Trunk (prototype) (CH) https://www.robo-mate.eu/active-trunk.html	Exosquelette actif d'assistance aux efforts en retour de flexion des hanches et du tronc. Compensation maximale d'environ 15 kg.	11 kg			

8.1.6 Exosquelettes pour le port d'outils

Nom de l'exosquelette Fabricant	Type d'exosquelette	Caractéristiques	Prix	Retour d'expérience OPPBTP	Images
Bm Exo – Ceinture exosquelette « Porte Outils » (FR) https://www.bm-exo.com/ceinture-exosquelette/	Harnais lombaire, support pour accessoires « ZéroGravité » Fonction porte-outils avec report du poids de l'outil sur la région lombo-pelvienne ; ou accessoires de soutien des membres supérieurs pour manutention de charges.	Deux modèles : - Aluminium 2,6kg ; - Carbone 1,6kg.		Point de vigilance : Impact du report de contrainte sur la région lombaire, variable selon accessoire utilisé et poids des charges mobilisées, à évaluer et suivre dans le temps.	
Exhauss – modèle Extrafor (FR) http://www.exhauss.com/fr_produits.htm	Exosquelette passif, d'assistance aux membres supérieurs, plutôt destinés aux manutentions manuelles, avec des niveaux d'assistance importants. Spécifique aux travaux forestiers.				
Exomed – Exoheaver (RU) https://exomed.org/	Exosquelette passif. Utilise un bras à ressort pour supporter de grandes charges.				

ExoRise – X-Arm (RU) https://exorise.com/	Exosquelette passif à 3^{ème} bras pour tenir un outil (peu important la hauteur et la longueur de l'outil). L'outil peut peser entre 2kg et 40kg.	Jusqu'à 17kg			
Ottobock – paexo wrist (DE) https://ottobockexoskeletons.com/paexo-wrist/?lang=fr	Exosquelette passif, offrant un maintien efficace du poignet lors de la manutention de charges. Développé spécifiquement pour le traitement de l'inflammation du poignet.	3 tailles			
RB3D – Modèle Exopush (FR) www.rb3d.com	Exosquelette d'assistance aux efforts de tirer-pousser sur râteau. Développé avec le concours de Colas pour assister l'activité des tireurs de râteau en application manuelle d'enrobés.	8,4 kg. Batterie (48 v) spécifique ; étanchéité (IP43).		Points de vigilance : - Dimensions de l'outil peu compatibles avec certaines situations et parfois gênantes dans un fonctionnement collectif ; - Modifiant l'organisation collective et l'activité individuelle, la qualité de la démarche d'intégration est déterminante.	

8.1.7 Exosquelettes pour les mains

Nom de l'exosquelette Fabricant	Type d'exosquelette	Caractéristiques	Prix	Retour d'expérience OPPBTP	Images
Bioservo – Modèle Ironhand « Gant bionique » (SE) https://www.bioservo.com/products	Exosquelette actif d'assistance à la prise manuelle, comprenant un élément moteur (+ batterie) porté dans le dos d'où sort un faisceau de câbles acheminés jusqu'à la main et reliés à un gant (gauche ou droit) muni de capteurs qui renseignent l'unité motrice. Un boîtier de commande est disposé sur une sangle d'épaule. Exosquelette destiné aux activités requérant un effort de « serrage » (prise en opposition de l'extrémité des doigts / talon de la main, ou en opposition pouce / autres doigts).	Différentes tailles de gant et de sac à dos. 2,8 kg Autonomie (fabricant) : 6-8 h. Multiples réglages pour le déclenchement différencié par doigt ; recueil de données relatives à l'activité.		Points de vigilance : - Les modèles actuels ne disposent de capteurs qu'à l'extrémité des doigts (au niveau de la pulpe) et sur le talon de la main, donc l'équipement ne convient pas pour la prise d'outils ne mettant pas en jeu l'extrémité des doigts (ex. outil à manche Ø < à 6-10 cm et selon mouvements) ; - Les câbles reliés aux moteurs cheminent au niveau du poignet en regard du canal carpien, zone exposée aux appuis ; - La compatibilité avec les gants de travail est réputée acquise, à vérifier selon modèles d'EPI ; - Fragilité du gant dans les phases d'équipement / déséquipement.	
Iturri – prexer (ES) https://exo.iturri.com/fr/	Exosquelette pour le pouce Soutient l'articulation carpo-métacarpienne et prévient le développement d'arthrose du pouce				
Ottobock – Paexo Thumb Slim (DE) https://paexo.com/?lang=fr	Exosquelette de pouce : permet de donner un appui au pouce pour rigidifier l'axe et soulager les muscles de la main et les contraintes articulaires dans les tâches supposant d'appuyer fort en utilisant la pulpe du pouce.				

8.2 Annexe 2 : Tableau des exosquelettes applicable au secteur de la construction

Okpala, I., Nnaji, C., Ogunseiju, O. & Akanmu, A. (2022). Assessing the Role of Wearable Robotics in the Construction Industry: Potential Safety Benefits, Opportunities, and Implementation Barriers. 10.1007/978-3-030-77163-8 8.

Table 8.3 Identified exoskeletons applicable in construction

S./no.	Wearable robot	Tasks	Characteristic	Category
1	FLx ErgoSkeleton	Pick and carry	Upper body	Passive
2	Hilti EXO-01	Elevated arms and repetitive arm motions	Upper body	Passive
3	SuitX MAX	Bending, lifting, squatting, elevated arms, and prolonged standing	Full body	Passive
4	Flex Lift	Bending, lifting, and standing	Full body	Passive
5	EksoVest	Elevated arms, static arms, and repeated arm motions	Upper body	Passive
6	Iron Hand	Grasping	Upper body (Wrist)	Active
7	FORTIS	Heavy tool and static arms	Semi-full body	Passive
8	ATOUN Model Y	Bending and lifting	Upper body	Active
9	Levitare Airframe	Elevated arms, static arms, and repeated arm motions	Upper body	Passive
10	Laevo	Bending, lifting, and reaching	Upper body	Passive
11	backX	Bending, lifting, reaching, and stooping	Upper body	Passive

8.3 Annexe 3 : Liste d'études sur les exosquelettes dans la construction

8.3.1 PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Industry Perception of the Suitability of Wearable Robot for Construction Work

Work-related musculoskeletal disorders is a serious problem affecting the construction workforce. Pipe workers are subjected to forward bending tasks that cause back injuries. Recent advancements in wearable robotic technologies have led to a growing interest in the use of back-support exoskeletons as a potential solution to reduce the occurrences of back injuries. However, without the willingness of workers to use exoskeletons, the intervention will not be successful in the industry. This study conducted a user assessment of a commercially available passive back-support exoskeleton for pipework in terms of usability, level of perceived discomfort, and subjective perception of the benefits, barriers to adoption, and design modifications. Fourteen pipe workers performed their regular work tasks using a passive back support exoskeleton and provided feedback on their experience with the device. The results indicate that the exoskeleton is easy to use (4.13 $\pm$ 0.34) and did not affect workers' productivity (2.07 $\pm$ 1.22). Participants reported willingness to use the exoskeleton but raised concerns about the compatibility of the exoskeleton with the safety harness. Reduced perceived discomfort was observed in the lower back. However, there was an increase in discomfort at the chest (20%), thigh (73%), and shoulder (250%). There was a strong correlation ($p < 0.05$) between discomfort at the chest, thigh, shoulder, and upper arm and workers' perception of usability of the exoskeleton. Health benefits such as reduction in stress in the back muscle were reported. Discomfort was experienced while using the exoskeleton in confined spaces. Design modifications, such as the integration of the safety harness and the tool strap with the exoskeleton, were identified. The findings are expected to inspire studies in the area of human-wearable robot interaction and task-specific applications of exoskeletons for construction work. DOI: 10.1061/JCEMD4.COENG-12762.

Mots clés : Work-related musculoskeletal disorders; Back injury; Wearable robot; Pipe workers; User perception

Gonsalves, N; Akanmu, A; Gao, XH; Agee, P; Shojaei, A, Industry Perception of the Suitability of Wearable Robot for Construction Work, *JOURNAL OF CONSTRUCTION ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 2023, vol. 149, n° 5

Usability and Biomechanical Testing of Passive Exoskeletons for Construction Workers: A Field-Based Pilot Study

The labor-intensive nature of the construction industry requires workers to frequently perform physically demanding manual work, thereby exposing them to the risk of musculoskeletal injury (approximately 31.2 cases per 10,000 full-time equivalent workers). Exoskeletons and exosuits (collectively called EXOs here) are designed to protect workers from these injuries by reducing exertion and muscle fatigue during work. However, the usability of EXOs in construction is still not clear. This is because extant EXO assessments in construction were mainly conducted in laboratory environments with test participants who are not construction professionals. In this research, we conducted a pilot study to investigate the usability of EXOs in a real construction workplace. Four experienced workers were recruited to push/empty construction gondolas with and without a Back-Support EXO, HeroWear Apex. Three workers were recruited to install/remove wooden blocks between steel studs with and without two Arm-Support EXOs, i.e., Ekso EVO and Hilti EXO-001. Their motions, postures, heart rates, and task completion times were recorded and compared. The workers were also surveyed to gather their attitudes toward the EXO's usefulness and ease of use. The study results demonstrated that the workers responded to the use of EXOs differently and consequently were not unanimously in favor of

EXO adoption in practice. The preliminary results and findings from this pilot study help in building a foundation of understanding to improve EXO products to fit the needs of construction workers and foster EXO-enabled construction tasks in the future.

Mots clés : passive exoskeletons; exosuits; usability testing; field tests; construction workers
Bennett, ST; Han, W; Mahmud, D; Adamczyk, PG; Dai, F; Wehner, M; Veeramani, D; Zhu, ZH, Usability and Biomechanical Testing of Passive Exoskeletons for Construction Workers: A Field-Based Pilot Study, *BUILDINGS*, 2023, vol. 13, n° 3

Controlling safety and health challenges intrinsic in exoskeleton use in construction

Construction practitioners have started exploring the use of exoskeletons within operations to combat the high rate of work-related musculoskeletal disorders, declining productivity, and worker attrition. In attempting to adopt exoskeletons, the ensuing human-robot interaction (HRI) can lead to the emergence of novel safety risks or the increment of existing safety risks as a result of hazards peculiar to the task-technology execution. These risks, if ignored, can worsen construction worker safety performance. This paper presents research aimed at developing insights needed to control safety risks associated with exoskeleton (wearable robot) use across three construction tasks - bricklaying, drywall installation, and concrete grinding and polishing. To achieve this aim, the Delphi method, which relied on inferential and descriptive statistics such as mean analysis and consensus evaluation, was employed to (1) quantify wearable robot safety risks for selected construction tasks, and (2) identify effective and feasible safety risk mitigation strategies using the study results. Findings from the present study include 10 critical safety and health risks associated with exoskeletons and 12 key safety risk mitigation strategies. This research contributes to knowledge by characterizing the safety risks and mitigation strategies associated with HRI and providing valuable insights that could be used by researchers to advance construction worker safety and health research. Through increased awareness of HRI safety risk and mitigation strategies, practitioners can prioritize safety resources and improve worker safety and productivity.

Mots clés : Construction safety; Wearable robots; Exoskeletons; Hazard assessment; Risk mitigation strategies

Nnaji, C; Okpala, I; Gambatese, J; Jin, ZY, Controlling safety and health challenges intrinsic in exoskeleton use in construction, *SAFETY SCIENCE*, 2023, vol. 157

Perceived Benefits, Barriers, Perceptions, and Readiness to Use Exoskeletons in the Construction Industry: Differences by Demographic Characteristics

Exoskeletons (EXOs) are a promising wearable intervention to reduce work-related musculoskeletal disorder risks among construction workers. However, the adoption of EXOs may differ with demographic characteristics. Survey data (n = 361) were collected from construction industry stakeholders and a summation score method was used to summarize respondent's benefits and barriers to EXO use, along with perceptions and readiness to use. Responses were stratified by race (White vs. non-White), sex (male vs. female), and age (<47 years vs. ≥47 years). Both a higher benefits score and a higher perceptions score were significantly and positively associated with a higher readiness to use score. There were also significant differences in perceived barriers to EXO use by race and sex. These results demonstrate substantial interest in EXO use but also emphasize the need to ensure proportionate access to the potential benefits of EXO technology.

Mots clés : Exoskeleton; work-related musculoskeletal disorders; technology adoption

Gutierrez, N; Ojelade, A; Kim, S; Barr, A; Akanmu, A; Nussbaum, M; Harris-Adamson, C, Perceived Benefits, Barriers, Perceptions, and Readiness to Use Exoskeletons in the

Construction Industry: Differences by Demographic Characteristics, *SSRN ELECTRONIC JOURNAL*, 2023

Performance and effectiveness of a passive back-support exoskeleton in manual material handling tasks in the construction industry

Work-related musculoskeletal disorders are a leading contributor to workplace injuries in the construction industry, with the low back being the most affected body part. Recent developments have led to the introduction of exoskeletons on industrial job sites as a means to mitigate the risk of work-related musculoskeletal disorders. Due to the newness of industrial exoskeletons, the successful application of this technology in the construction industry requires a thorough evaluation of different aspects of its adoption, especially user acceptance, to ensure a successful and effective uptake. As manual material handling tasks are the most common cause of low back injuries, this study aimed to evaluate the impact of using exoskeletons when adopting different postures during dynamic and static manual material handling tasks. An experiment was carried out and data reflecting Rate of Perceived Exertion, Level of Discomfort, overall fit and comfort, effectiveness, and interference levels were collected. Overall, the participants perceived the exoskeleton suit as effective, with discomfort being reduced in the low back and most other body parts. However, the results indicated the importance of considering the specific task at hand (e.g., dynamic vs static manual material handling) and the posture adopted (e.g., squatting vs stooping) when evaluating and selecting an exoskeleton for construction tasks. Also, the results show differences between male and female participants in most usability and effectiveness responses. In conclusion, passive exoskeletons have the potential to be adopted to reduce the rate of WMSDs in construction. However, proper training and supervision are required on the postures adopted by the workers, based on the specific characteristics of the task carried out. Also, different results from male and female responses show that different exoskeletons, or an exoskeleton with two different designs, may lead to higher efficiency than using one exoskeleton for both groups.

Mots clés : Exoskeleton; Back-support; Manual material handling; Construction; Ergonomics; Wearable robot

Golabchi, A, Jasimi Zindashti, N, Miller, L, Rouhani, H, Tavakoli, M, Performance and effectiveness of a passive back-support exoskeleton in manual material handling tasks in the construction industry, *CONSTRUCTION ROBOTICS*, 2023, pp. 1-12

Identifying Facilitators, Barriers, and Potential Solutions of Adopting Exoskeletons and Exosuits in Construction Workplaces

Exoskeletons and exosuits (collectively termed EXOs) have the potential to reduce the risk of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) by protecting workers from exertion and muscle fatigue due to physically demanding, repetitive, and prolonged work in construction workplaces. However, the use of EXOs in construction is in its infancy, and much of the knowledge required to drive the acceptance, adoption, and application of this technology is still lacking. The objective of this research is to identify the facilitators, barriers, and corresponding solutions to foster the adoption of EXOs in construction workplaces through a sequential, multistage Delphi approach. Eighteen experts from academia, industry, and government gathered in a workshop to provide insights and exchange opinions regarding facilitators, barriers, and potential solutions from a holistic perspective with respect to business, technology, organization, policy/regulation, ergonomics/safety, and end users (construction-trade professionals). Consensus was reached regarding all these perspectives, including top barriers and potential solution strategies. The outcomes of this study will help the community gain a comprehensive understanding of the potential for EXO use in the construction industry,

which may enable the development of a viable roadmap for the evolution of EXO technology and the future of EXO-enabled workers and work in construction workplaces.

Mots clés : Delphi; exoskeletons; exosuits; wearable devices; construction

Mahmud, D; Bennett, ST; Zhu, ZH; Adamczyk, PG; Wehner, M; Veeramani, D; Dai, F, Identifying Facilitators, Barriers, and Potential Solutions of Adopting Exoskeletons and Exosuits in Construction Workplaces, *SENSORS*, 2022, vol. 22, n° 24

Assessing the Role of Wearable Robotics in the Construction Industry: Potential Safety Benefits, Opportunities, and Implementation Barriers

High rate of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) remains a major concern of practitioners and researchers in the construction industry. Among current developments in automation and robotics, wearable robots (exoskeletons) have gained some traction as a viable tool that could improve construction workers' safety, health, and productivity at work. However, limited studies have explored the efficacy and effectiveness of existing exoskeletons in reducing risks of WMSD in the construction domain. Also, information on factors that prevent the successful implementation of wearable robots on construction projects is scarce. To bridge this gap, the present study presents the result of a multiphase process aimed at providing an in-depth perception-based evaluation of the capability of commercially available wearable robots. This process comprises of a detailed literature review, insights from an online survey, and usability studies from a lab-simulated construction task. First, 11 wearable robots with potential utility in construction operations were identified followed by a detailed assessment of the potential role these technologies could play in reducing well-established risk factors of work-related musculoskeletal injuries. Also, the authors evaluated the suitability of these robots for construction work involving heavy or repetitive lifting, and prolonged stooped postures, and synthesized the barriers to the acceptance of these robots. Results from the present study indicate that wearable robots could prevent about 60% of construction-related WMSDs impacting the different body regions (lower and upper back, feet and ankle, wrist and hand, and shoulder) and 30–40% of accidents associated with critical WMSD risk factors. Keywords Wearable robotics Construction technology Safety performance Ergonomic exposures Work-related musculoskeletal disorders Automation

Mots clés : Wearable robotics; Construction technology; Safety performance; Ergonomic exposures; Work-related musculoskeletal disorders; Automation

Okpala, I; Nnaji, C; Ogunseiju, O; Akanmu, A, Assessing the Role of Wearable Robotics in the Construction Industry: Potential Safety Benefits, Opportunities, and Implementation Barriers, *AUTOMATION AND ROBOTICS IN THE ARCHITECTURE, ENGINEERING, AND CONSTRUCTION INDUSTRY*, 2022, pp. 165-180

Exoskeletons in construction and their role in the Future of Work

The construction trade requires repetitive, physically demanding manual tasks which can over time pose severe risks for work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) [1]. Exoskeletons and exosuits (collectively called “EXOs” in this work) have substantial potential to protect workers and to increase worker productivity by reducing exertion and fatigue. Despite these potential benefits, EXOs are uncommon in the construction industry. We present preliminary results from a pilot study investigating the knowledge gaps and barriers to EXO adoption. The overall objective of this work is to establish a foundational understanding of how EXOs can transform the future of construction trade work. The described work focuses on industry collaboration and field-based kinematic evaluation of four subjects performing a real-world construction task, namely dumping a gondola of refuse into a bin. Our preliminary findings build a foundation of understanding of EXO-enabled construction tasks. This will foster EXO

adoption and yield benefits including but not limited to improving the productivity of construction trades, reducing the risks of WMSDs and injuries of trade workers, broadening the workforce participation in construction trades, and extending the career life expectancy of existing trade workers.

Bennett, ST; Adamczyk, P; Dai, Fei; Veeramani, D; Wehner, M; Zhu, ZH, Exoskeletons in construction and their role in the Future of Work, *PROCEEDINGS OF THE 1ST FUTURE OF CONSTRUCTION WORKSHOP AT THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA 2022)*, 2022

Field-Based Assessment of Joint Motions in Construction Tasks with and Without Exoskeletons in Support of Worker-Exoskeleton Partnership Modeling and Simulation

Construction workers are required to perform repetitive, physically demanding manual handling work which may pose severe risks for work-related musculoskeletal disorders and injuries. Exoskeletons have substantial potential to protect worker safety and well-being and increase construction productivity by augmenting and complementing workers' physical abilities. However, a key barrier for their adoption in construction is the lack of rigorous research-based real-world evaluation of the beneficial impact of exoskeleton use in practice. As the foundational step to address this issue, this paper presents a field-based assessment to reconstruct and analyze worker joint motions with and without back- and shoulder-assisted exoskeletons in two construction tasks: pushing/emptying gondolas and installing/removing wooden blocks between steel studs. The findings from this research will inform future investigations on worker-exoskeleton partnership to model and simulate the impact on worker and work performance from various perspectives including biomechanics, ergonomics, productivity, and profitability.

Mots clés : Productivity; Biological system modeling; Exoskeletons; Shoulder; Data models; Safety; Steel

Bennett, ST; Adamczyk, P; Dai, Fei; Wehner, M; Veeramani, D; Zhu, ZH, Field-Based Assessment of Joint Motions in Construction Tasks with and Without Exoskeletons in Support of Worker-Exoskeleton Partnership Modeling and Simulation, *ONLINE WORLD CONFERENCE ON SOFT COMPUTING IN INDUSTRIAL APPLICATIONS*, 2022, pp. 2463-2474

Occupational Exoskeleton Adoption and Acceptance in Construction and Industrial Work: A Scoping Review

Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) pose a significant risk to construction and industrial workers and can result in serious costs for both individuals and businesses. Exoskeletons are one potential occupational intervention being explored to help mitigate risk of WMSDs in construction and industrial domains. However, more research is needed on worker acceptance and adoption, as the usefulness and benefits of an effective exoskeleton intervention will be lost if the workers fail to embrace it. To address this gap, this scoping review synthesizes the current literature on worker acceptance and adoption of occupational exoskeletons using PRISMA's methodology. The results present assessments; acceptance factors using a Work Systems Model framework. Information about the main barrier to adoption, discomfort, other barriers, and other key considerations and implications for future exoskeleton development and research are discussed.

Andrade, C; Nathan-Roberts, D, Occupational Exoskeleton Adoption and Acceptance in Construction and Industrial Work: A Scoping Review, *PROCEEDINGS OF THE HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY ANNUAL MEETING*, 2022, vol. 66, n° 1, pp. 1325-1329

Upper extremity exoskeletons in construction, a field-based study

The construction trade requires repetitive, physically demanding manual tasks which can over time pose severe risks for work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) [1]. Exoskeletons and exosuits (collectively called “EXOs” in this work) have substantial potential to protect workers and to increase worker productivity by reducing exertion and fatigue. Despite these potential benefits, EXOs are uncommon in the construction industry. We present preliminary results from a pilot study investigating the knowledge gaps and barriers to EXO adoption. The overall objective of this work is to establish a foundational understanding of how EXOs can transform the future of construction trade work. The described work focuses on industry collaboration and field-based kinematic evaluation of three subjects performing a real-world construction task, removing wooden blocks from a steel-frame wall. We demonstrate the range of motion of the upper extremities of the subjects performing the task unassisted, followed by performing the task wearing two upper-extremity EXOs. This work is presented in parallel with our separate study (evaluating the effects of a lower back EXO while dumping a gondola of refuse) also presented at this workshop. Our preliminary findings build a foundation of understanding of EXO-enabled construction tasks. This will foster EXO adoption and yield benefits including but not limited to improving the productivity of construction trades, reducing the risks of WMSDs and injuries of trade workers, broadening the workforce participation in construction trades, and extending the career life expectancy of existing trade workers.

Bennett, ST; Adamczyk, P; Dai, Fei; Veeramani, D; Wehner, M; Zhu, ZH, Upper extremity exoskeletons in construction, a field-based study, *PROCEEDINGS OF THE 1ST FUTURE OF CONSTRUCTION WORKSHOP AT THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION (ICRA 2022)*, 2022

Assessment of a passive exoskeleton system on spinal biomechanics and subjective responses during manual repetitive handling tasks among construction workers

An exoskeleton system can be an effective ergonomic intervention for mitigating the risks of developing work-related musculoskeletal disorders, yet little attention is given to the effects of its application on physical risk factors and subjective responses. Therefore, the objective of this study was to examine the effects of a passive exoskeleton system on spinal biomechanics and subjective responses during manual repetitive handling tasks among construction workers. Muscle activity of the Thoracic Erector Spinae (TES), Lumbar Erector Spinae (LES) at L3 vertebrae level, Rectus Abdominis (RA), and External Oblique (EO) during the repetitive handling tasks were measured by surface electromyography (sEMG). Additionally, the Borg categorical rating scale (Borg CR 10), local perceived pressure (LPP), and system usability scale (SUS) were used to measure the ratings of perceived discomfort, perceived musculoskeletal pressure, and system usability, respectively. Our results found that: (1) the use of the passive exoskeleton system significantly reduced LES muscle activity (11-33% MVC), with a greater reduction in LES muscle activity (32.71% MVC) for the heaviest lifting load; (2) the use of the passive exoskeleton system significantly reduced perceived discomfort scores (42.40%) of the lower back for the heaviest lifting load; (3) increased lifting load significantly increased LPP scores of the shoulder, lower back, and leg body parts; and (4) majority of the participants rated the passive exoskeleton system as having acceptable usability. The findings of these results indicate that the developed passive exoskeleton system could reduce the internal muscle force, extensor moments, and spinal forces in the lumbar region.

Mots clés : Construction workers; Ergonomic intervention; Exoskeleton; Manual repetitive handling tasks; Muscle activity

Antwi-Afari, MF; Li, H; Anwer, S; Li, DW; Yu, Y; Mi, HY; Wuni, IY, Assessment of a passive exoskeleton system on spinal biomechanics and subjective responses during manual repetitive handling tasks among construction workers, *SAFETY SCIENCE*, 2021, vol. 142

Exoskeletons for manual material handling - A review and implication for construction applications

The construction industry is labor-intensive and physically demanding even with continuous development of advanced tools and machines. Workers are heavily involved in manual procedures, which constantly expose them to a great risk of injury. Recently, exoskeletons and their potential to protect workers from injury have received wide attention. Significant advances have been made in both of their industrial developments and scholarly assessment. This paper reviewed existing exoskeleton technologies and analyzed their potential for manual handling tasks in construction. It first retrieved 85 relevant research articles and categorized them based on exoskeleton types, functions, and assessment procedures. Then, the potential of the exoskeleton use in construction at trade level was analyzed. A map was generated to suggest the potential exoskeleton type for each trade with evaluation of benefits and challenges. The map is expected to provide construction professionals with insights and guidelines when integrating exoskeletons into their current routine construction practices.

Mots clés : Exoskeleton; Work-related musculoskeletal disorders; Construction trades; Review
Zhu, ZH; Dutta, A; Dai, F, Exoskeletons for manual material handling - A review and implication for construction applications, *AUTOMATION IN CONSTRUCTION*, 2021, vol. 122

Model-based mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for assisting workers in shotcrete projection

Despite the current industrial trend towards automation, many workers are still daily exposed to heavy loads during their duties. Regarding the construction industry, the shotcrete projection results in a particularly arduous whole-body effort for the so-called "concrete reinforcement workers". In this paper, the design of a passive robotic human assistance tool to assist workers in dealing with the specific task of shotcrete projection will be described. If the design of an effective aid plays a crucial role in improving the job's quality, following the guidelines given by the French company Eiffage Infrastructures; besides, the acceptance of the proposed solution shall have special consideration. Therefore, starting from an in-site assessment of the scenario, the presented solution has been profoundly adjusted to address the issues coming from this particular task. The exoskeleton adaptability to different lower-limb activities has been preserved without lowering its comfort during daily life in the working area. The developed solution's operation range has been specifically optimized to assist the worker during specific efforts without hindering the other movements.

Mots clés : Wearable robotics; Exoskeletons for workers; Passive lower-limb exoskeletons; Task-oriented design

Capitani, SL; Bianchi, M; Secciani, N; Pagliai, M; Meli, E; Ridolfi, A, Model-based mechanical design of a passive lower-limb exoskeleton for assisting workers in shotcrete projection, *MECCANICA*, 2021, vol. 56, n° 1, pp. 195-210

Assessment of a passive wearable robot for reducing low back disorders during rebar work

Low back disorder continues to be prevalent amongst construction workers, especially the rebar workers who are often engaged in repetitive stooping postures. Wearable robots, exoskeletons, are recent ergonomic interventions currently explored in the construction

industry that have potentials of reducing the risks of low back pain by augmenting users' body parts and reducing demands on the back. This paper presents the assessment of a commercially available passive wearable robot, BackX, designed for reducing low back disorder amongst rebar workers. The study evaluated the exoskeleton in terms of task performance and physiological conditions. Outcome measures such as completion time were employed to evaluate the effect of the exoskeleton on task performance, while activations of Erector Spinae and Latissimus Dorsi muscles, and perceived discomfort across body parts were employed to assess the physiological effects of the exoskeleton. The results indicated mixed effects of the exoskeleton on muscle activations. Although the results revealed that the exoskeleton can reduce muscle activations across the Latissimus Dorsi, mixed effects were observed for the Erector Spinae especially during the forward bending tasks. The exoskeleton reduced completion time by 50% during the rebar tasks. There was also a 100% reduction in perceived discomfort on the back, but discomfort was tripled at the chest region when the exoskeleton was worn. This study reveals the potentials of the exoskeleton for reducing low back disorder and improving productivity amongst the rebar workers. However, the unintended consequences such as increased discomfort at the chest region and activations of the muscles highlight the need for improving existing exoskeleton designs for construction work.

Mots clés : Low back disorders; Wearable robots; Exoskeleton; Rebar work; Electromyography; Muscleactivity; Discomfort

Gonsalves, N; Ogunseiju, O; Akanmu, A; Nnaji, C, Assessment of a passive wearable robot for reducing low back disorders during rebar work, *JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION*, 2021, vol. 26, pp. 936-952

Enhancement of human-centered workplace design and optimization with Exoskeleton technology

The employment of intelligent tools in production, such as the new area of wearable robotics, the Exoskeletons, represents valuable and promising technology to reduce the physical stress and increase innovation, productivity and workplace safety. The challenge of realizing these advanced manufacturing environments with integrated Exoskeletons is represented by missing design and planning methods required to equip future workplaces with this enabling technology. The integration of Exoskeletons in logistics and production activities creates a new hybrid type of workstation that has to be designed according to a scientific approach. The article presents the first steps in developing an innovative approach to planning and optimizing intelligent working environments with integrated adaptive Exoskeletons. The topic harmonizes three main areas of research: a) production technologies and holistic planning of production processes; b) ergonomics, safety and security of workers in production environments and c) configuration based on the components of the new type of wearable robotics, the Exoskeletons. The validation of this approach is provided through the creation of digital human/Exoskeleton models combining digital Exoskeleton with various digital human models. The Digital Twin of the human/Exoskeleton system is the heart of a holistic design and optimization process that aims to assess the appropriateness of the selected Exoskeleton by simulating the tasks performed and adapting the simulation parameters. An exemplary validation case in one of the most innovative and dynamic sector, the construction sector, demonstrates the applicability of the model. A guideline for migrate the model in other industry sectors is provided, as well.

Mots clés : Exoskeleton technology; Design; Planning Methodology

Ippolito, D; Constantinescu, C; Rusu, CA, Enhancement of human-centered workplace design and optimization with Exoskeleton technology, *PROCEDIA CIRP*, 2020, vol. 91, pp. 243-248

Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions

Work-related musculoskeletal injuries and disorders remain an important problem in the construction industry. Exoskeletons are an emerging wearable technology that assists or augments a user's physical activity or capacity. This technology is a potential solution to reduce the physical demands and fatigue experienced by construction workers and help improve worker safety, health, and performance. As a first step towards enabling exoskeleton use in construction, we captured the perspectives of construction industry stakeholders regarding adopting exoskeletons and continued use in practice. Stakeholder responses highlighted several important questions and concerns, which were grouped using qualitative content analysis into three categories: (1) expected benefits, (2) exoskeleton technology adoption factors, and (3) perceived barriers to use. Uncertainties were expressed about the practical value and usability of exoskeleton technologies, and the impact of this technology on worker safety. Given this, and the limited state of current evidence, we summarize important research gaps that need to be addressed in future for successful adoption and use of exoskeleton technologies in the construction industry.

Mots clés : Exoskeleton; technology transfer; intervention; work-related musculoskeletal disorders; construction industry

Kim, S; Moore, A; Srinivasan, D; Akanmu, A; Barr, A; Harris-Adamson, C; Rempel, D; Nussbaum, M, Potential of Exoskeleton Technologies to Enhance Safety, Health, and Performance in Construction: Industry Perspectives and Future Research Directions, *IIE TRANSACTIONS ON OCCUPATIONAL ERGONOMICS AND HUMAN FACTORS*, 2019, vol. 7, n° 0, pp. 185-191

Identification of Usage Scenarios for Robotic Exoskeletons in the Context of the Hong Kong Construction Industry

Exoskeletons can be seen as an archetype of a truly sustainable manufacturing technology since they empower human beings rather than aiming at their substitution. Exoskeletons have been characterized by rapid technological advances in the last decade, as well as an increase of activities attempting to develop feasible usage scenarios for many industries. However, usage concepts for this technology in the construction industry are still rare. This contrasts with the fact that exoskeletons are theoretically ideal for labor intensive industries such as construction. Therefore, in the study presented in this paper, we made a first attempt to conceptually bridge the gap between exoskeleton typologies and construction tasks so as to provide guidance for future target oriented scenarios and technology development. We utilized the Hong Kong housing construction industry as a case study. Consequently, we developed a construction specific classification of exoskeletons and analyzed the suitability and applicability of the resulting exoskeleton types for Hong Kong's housing construction tasks. Our study identified, amongst others, hotspot task areas with high appropriateness for exoskeleton use, task areas with similar needs and usage patterns regarding exoskeletons. Furthermore, our study sheds light on the regimes and rationales behind the identified appropriateness levels. Based on our findings, a set of basic guidelines was developed to support and govern future research and development activities targeting the exoskeleton usage in construction.

Mots clés : Exoskeletons; Classification; Task Analysis; Housing Construction; Hong Kong; Sustainability

Linner, T; Pan, Mi; Pan, W; Taghavi, M; Pan, W; Bock, T, Identification of Usage Scenarios for Robotic Exoskeletons in the Context of the Hong Kong Construction Industry, *PROCEEDINGS OF THE 35TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC)*, 2018, pp. 40-47

Construction Robots: Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots

Learn how Single-Task Construction Robots (STCRs) can improve productivity in the construction industry with this cross-disciplinary text. This third volume in The Cambridge Handbooks in Construction Robotics series discusses the STCRs employed on construction sites since the development of the approach in the 1980s, presents current applications, and highlights upcoming trends in the construction automation and robotics field. Two hundred different types of STCR are presented, from the simplest models comprising simple manipulators and mobile platforms, to those utilizing more sophisticated technologies such as aerial robotics, swarm robotics, exoskeletons, additive manufacturing technologies, self-assembling building structures, and humanoid robotics. Real-world case studies demonstrate the different application scenarios for each approach, and highlight the key implementation and management issues. With an easy-to-follow structure, and including hundreds of color illustrations, it provides an excellent toolkit for professional engineers, researchers, and students.

Bock, T; Linner, T, *Construction Robots: Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2016

8.3.2 PROJETS R&D

Human Centered Technologies for a Safer and Greener European Construction Industry (HumanTech)

- Dates : 01/06/2022-30/05/2025
- Coordinateur : DEUTSCHES FORSCHUNGSZENTRUM FUR KUNSTLICHE INTELLIGENZ GMBH (DE)
- Résumé

L'industrie européenne de la construction est confrontée à trois défis majeurs : améliorer sa productivité, accroître la sécurité et le bien-être de sa main-d'œuvre et s'orienter vers une industrie verte et économe en ressources. Pour relever ces défis de manière adéquate, HumanTech propose une approche centrée sur l'homme, impliquant des technologies révolutionnaires telles que les dispositifs portables pour la sécurité et le soutien des travailleurs, et une technologie robotique intelligente qui peut coexister harmonieusement avec les travailleurs humains tout en contribuant à la transition écologique de l'industrie. Notre objectif est de réaliser des avancées majeures au-delà de l'état de l'art actuel dans toutes ces technologies, qui peuvent avoir un effet perturbateur sur la façon dont la construction est menée par une nouvelle génération d'ouvriers et d'ingénieurs de la construction hautement qualifiés, hommes et femmes, travaillant dans un environnement numérique sûr et gratifiant.

Ces avancées comprendront

L'introduction de dispositifs robotiques dotés d'une vision et d'une intelligence leur permettant de naviguer de manière autonome et sûre dans un environnement très peu structuré, de collaborer avec les humains et de mettre à jour de manière dynamique un jumeau numérique sémantique du chantier de construction. La capture d'informations visuelles s'étendra à l'imagerie multispectrale permettant de détecter la composition matérielle des structures construites en plus des caractéristiques géométriques.

Des équipements intelligents et discrets de protection et d'assistance des travailleurs, allant des exosquelettes déclenchés par des capteurs portables de pose et de déformation du corps, aux caméras portables et aux lunettes XR, permettront de localiser et de guider les travailleurs en temps réel afin qu'ils accomplissent leurs tâches de manière efficace et précise.

Une toute nouvelle catégorie de jumeaux numériques dynamiques et sémantiques (DSDT) de chantiers de construction simulant en détail l'état actuel d'un chantier au niveau géométrique et sémantique, sur la base d'une formulation BIM élargie englobant toutes les dimensions structurelles et sémantiques pertinentes (BIMxD). Les BIMxD serviront de référence commune pour tous les travailleurs humains, les ingénieurs et les machines autonomes.

- <https://cordis.europa.eu/project/id/101058236/fr>

Breakthrough European tEchnologies Yielding cOnstruction sovereigNty, Diversity & Efficiency of ResourceS (BEEYONDERS)

- Dates : 01/06/2022-30/11/2025
- Coordinateur : ACCIONA CONSTRUCCION SA (ES)
- Partenaires français : CSTB, HOLCIM, SEABOOST
- Résumé
Le vieillissement de la main-d'œuvre européenne et la pénurie de main-d'œuvre dans le secteur de la construction, provoqués par les tendances démographiques, ont besoin de soutien. Le projet BEEYONDERS, financé par l'UE, concevra, développera et intégrera des technologies innovantes, notamment l'intelligence artificielle et les véhicules autonomes, pour aider le secteur à devenir plus efficace et plus attrayant pour les jeunes. Ces outils sophistiqués permettront également d'améliorer la sécurité, la productivité, la qualité et l'impact environnemental des projets de construction. En collaboration avec les principales parties prenantes, BEEYONDERS développera des solutions sophistiquées qui garantiront la sécurité, le bien-être et la formation des travailleurs en testant et en validant des études de cas axées sur les bâtiments, les infrastructures maritimes, l'entretien et la construction des routes, ainsi que les tunnels. Ce travail profitera à la main-d'œuvre, attirera de futurs travailleurs et favorisera l'égalité des sexes.
- Commentaires : Mention des exosquelettes dans les objectifs :
Solutions will be developed for supporting the integration of autonomous and tele-operated, ground and aerial robotic platforms and heavy equipment in harsh environments. Innovative additive manufacturing solutions will be developed for resource optimization and for protection of biodiversity in maritime works. Safety, wellbeing, and training of workers will be improved through the development of exoskeletons, advanced wearables, and learning resources supported by XR technologies. A Digital Twin enriched with AI-based layers for decision-making will support seamless integration and management of all Project technologies.
- <https://cordis.europa.eu/project/id/101058548/fr>

8.4 Annexe 4 : Détails des informations recueillies dans l'étude de la perception des entreprises

Attractivité perçue

Leviers existants :

Modernisation des environnements de travail : 19 entreprises sur 29

Exemples : amélioration des ressources matérielles, développement d'aides à la maintenance, automatisation.

Amélioration de la qualité de vie au travail : 14 entreprises sur 29

Exemples : développer l'esprit d'équipe, la bonne ambiance

Amélioration des salaires et avantages : 8 entreprises sur 29

Amélioration de l'image de l'entreprise 5 entreprises sur 29

Amélioration des conditions de travail : 5 entreprises sur 29

Exemples : lutter contre la pénibilité, EPI, ambiance sonore, rythme de travail

Amélioration de l'organisation du travail : 5 entreprises sur 29

Exemples : flexibilité horaire, polyvalence, management, communication interne.

Amélioration des infrastructures : 4 entreprises sur 29

Exemples : locaux fermés, chauffés, propres, modernes.

Les leviers souhaités :

Conditions de travail : 15 entreprises sur 29

Exemples : Amélioration générale des conditions de travail, des ressources matérielles, acquérir des aides à la maintenance, allègement des charges, amélioration de l'ambiance sonore, ...

Salaires et avantages : 8 entreprises sur 29

Exemples : Amélioration de la rémunération, des avantages sociaux, des primes, etc.

Organisation du travail : 4 entreprises sur 29

Exemples : flexibilité horaire, semaine de 4 jours

Image de l'entreprise : 2 entreprises sur 29

Locaux : 2 entreprises sur 29

Autres : formation, management, environnement.

Projets, idées ou envies :

Conditions de travail : 10 entreprises sur 29

Exemples : modernisation des ateliers, achat de matériel/machine, étude ergonomique, exosquelette, etc.

Organisation du travail, de l'entreprise : 2 entreprises sur 29

Exemples : développer la mobilité interne, la polyvalence

Salaire et avantage : 1 entreprise sur 29

Pas de projets ou amélioration des postes déjà réalisée : 3 entreprises sur 29

Critères de recrutement

« Sur ces professions, avez-vous des critères de recrutement ? »

Sur ces professions, avez-vous des critères de recrutement?				
	Savoir-être (autonomie, esprit d'initiative, etc)	Capacité à travailler en collaboration	Motivation du candidat à intégrer l'entreprise	Salaire demandé en accord avec le marché
Décisif	11	16	21	10
Préféré	15	9	5	14
Peu important	1	2	1	3
Non pris en compte	0	0	0	0
Rédhibitoire	0	0	0	0
Non répondu	2	2	2	2

Sur ces professions, avez-vous des critères de recrutement?					
	Diplôme (études, CACES, etc)	Expérience dans un poste similaire	Expérience dans une entreprise similaire	Savoir-faire sur certains outils ou machines	Flexibilité du candidat (horaires, lieux de travail, etc)
Décisif	2	4	1	1	7
Préféré	10	18	20	23	13
Peu important	5	4	5	2	3
Non pris en compte	10	1	1	2	3
Rédhibitoire	0	0	0	0	1
Non répondu	2	2	2	1	2

Sur ces professions, avez-vous des critères de recrutement?		
	Age : plutôt jeune	Genre : femme
Décisif	0	0
Préféré	3	3
Peu important	9	6
Non pris en compte	15	18
Rédhibitoire	0	0
Non répondu	2	2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de son article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon exposant son auteur à des poursuites en dommages et intérêts ainsi qu'aux sanctions pénales prévues à l'article L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle.