



HAL
open science

Human Factors benefit for a better integration of exoskeletons in Industry.

Aurélie Moyon

► **To cite this version:**

Aurélie Moyon. Human Factors benefit for a better integration of exoskeletons in Industry.. Mechanical engineering [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2020. English. NNT : 2020ECDN0020 . tel-04614177

HAL Id: tel-04614177

<https://theses.hal.science/tel-04614177>

Submitted on 17 Jun 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

ÉCOLE DOCTORALE N° 602

Sciences pour l'Ingénieur

Spécialité : Génie mécanique

Par

« **Aurélie MOYON** »

Apport des facteurs humains pour une meilleure intégration des exosquelettes dans l'industrie

Thèse présentée et soutenue à L'Ecole Centrale de Nantes, le 8 Octobre 2020.

Unité de recherche : UMR 6004, Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N)

Rapporteurs avant soutenance :

Jean-Claude SAGOT Professeur des universités, Université Technologique de Belfort-Montbéliard, Belfort
Guillaume THOMANN Maître de conférence HDR, Université Grenoble-Alpes

Composition du Jury :

Président : Jérémy LEGARDEUR, Professeur, ESTIA, Bidart

Dir thèse : Emilie POIRSON, Maître de conférence HDR, Ecole Centrale de Nantes
Co-dir : Jean-François PETIOT, Professeur des universités, Ecole Centrale de Nantes
Co-encadrant : Sébastien LE LOCH, Maître de conférence, Université de Nantes

Avant-propos

Je tiens en premier lieu à remercier tous les participants qui se sont portés volontaires pour les expérimentations. La plupart d'entre elles étant assez dures physiquement. Plus particulièrement les compagnons des sociétés BENETEAU et AIRBUS Nantes, déterminés à tester des exosquelettes, de jour comme de nuit. J'ai dû promettre beaucoup de brioches.

Je remercie bien sûr mes encadrants pour avoir accepté de me suivre pendant 3 ans, pour leurs apports complémentaires, leur rigueur et leur bienveillance.

Merci également aux membres du groupe AFNOR pour leurs contributions, notamment Jean Theurel, Jean-Jacques Atain Kuadio, Mathilde Schwartz (INRS), Yonel Giovanelli (SNCF), Estelle Chin (PSA), Claude Gimenez (AIRBUS).

Un remerciement chaleureux aux rapporteurs, Mr Sagot et Mr Thomann qui ont accepté de lire ce travail en période estivale. Ainsi qu'à Mr Legardeur pour avoir présidé le jury de soutenance.

Merci à mes collègues des équipes PACCE et RoMas pour les échanges scientifiques et les discussions quotidiennes qui ont alimenté ce travail de recherche. Je garderai un très bon souvenir des séances sportives avec mes collègues et j'espère les retrouver bientôt sur les bords de l'Erdre.

Enfin je remercie mes proches et mes amis pour leur soutien infailible durant cette période intense mais extrêmement enrichissante.

Glossaire

Mots clefs et Abréviations

Acceptation technologique : l'acceptation est reliée à la manière dont les utilisateurs perçoivent positivement la technologie lors de son utilisation. Cette notion est fortement reliée à l'utilisabilité.

Activité : compromis fait par l'opérateur entre règles de sécurité et nécessités de la performance...) pour atteindre les buts fixés par la tâche.

Contexte d'utilisation : utilisateurs, tâches, équipement (matériel, logiciel et documents) et environnements physique et social d'utilisation d'un produit.

Conception centrée sur l'opérateur humain : approche de conception ayant pour objectif d'améliorer l'utilisabilité des systèmes interactifs en se concentrant sur l'utilisation du système concerné, et en appliquant les connaissances et techniques existantes en matière de facteurs humains/d'ergonomie et d'utilisabilité. Le terme « conception centrée sur l'opérateur humain » est employé de préférence au terme « conception centrée sur l'utilisateur » afin de souligner que la partie de l'ISO 9241 couvre également les effets sur un grand nombre de parties prenantes, et non simplement les individus considérés généralement comme utilisateurs. Toutefois, dans la pratique, ces termes sont souvent utilisés comme synonymes.

Efficience : rapport entre les ressources dépensées et la précision et le degré d'achèvement selon lesquels l'utilisateur atteint des objectifs spécifiés. Terme utilisé de manière équivalente au terme performance.

Ingénierie des facteurs humains : discipline scientifique qui vise la compréhension des interactions entre l'homme et les autres composantes d'un système, et la mise en œuvre dans la conception de théories, de principes, de méthodes et de données pertinentes afin d'améliorer la satisfaction mesurable des humains et l'efficacité globale des systèmes.

Exosquelette : Dispositif d'assistance physique ayant une structure externe au corps humain. Il est destiné à soulager une activité physique induisant une posture pénible.

Expérience de l'utilisateur : perceptions et réactions d'une personne qui résultent de l'utilisation effective et/ou anticipée d'un produit, système ou service, qui interviennent avant,

pendant et après l'utilisation. Les critères d'utilisabilité peuvent être utilisés pour évaluer les aspects de l'expérience de l'utilisateur.

Opérateur/opératrice : personne effectuant une activité de travail, indépendamment du statut.

Système Humain-Machine : combinaison de matériels, logiciels et/ou services qui reçoit des données provenant des utilisateurs et qui leur communique des informations résultantes. Cela inclut, le cas échéant, le conditionnement, la documentation de l'utilisateur, l'assistance et la formation.

Satisfaction : absence d'inconfort, et attitudes positives dans l'utilisation du produit.

Tâche : actions que l'on demande à l'opérateur de faire, avec des moyens dédiés, en suivant certaines procédures, et en respectant des contraintes (temporelle, humaines...).

Troubles musculosquelettiques (TMS) : troubles de l'appareil locomoteur (tissus mous) pouvant entraîner des douleurs, une perte de force, une dans certains cas un handicap irréversible.

Utilisabilité : degré selon lequel un système, un produit ou un service peut être utilisé, par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié.

Utilisateur : personne qui interagit avec le produit.

Liste des illustrations

Figure 1. Organisation des parties prenantes engagées dans le travail de recherche.	20
Figure 2. Représentation chronologique des connaissances acquises au cours des expérimentations en lien avec les problématiques de recherche, en parallèle des évènements marquants de l'entreprise.	26
Table 2 : Répartition des articles dans les chapitres en fonction des objectifs de recherche.	27
Figure 3. Un 'bras zéro gravité pneumatique' (Europe Technologies, 2019) aide l'opérateur à positionner une pièce lourde avec un effort très faible.	34
Figure 4. Un des premiers exosquelettes industriels. Hardiman, General Electric, 1965. ...	36
Figure 6. L'exosquelette pneumatique Innophys (Innophys CO, LTD), 2018.....	39
Figure 7. Un exosquelette actif dédié à la réhabilitation médicale au CES, 2019. Image récupérée sur le blog Forbes (2019).	40
Figure 8. a) : Un opérateur teste l'exosquelette Levitate Airframe (Levitate Technologies) sur un site de BMW ¹⁰ , 2018 b) : L'exosquelette Shiva développé par la SNCF, 2018.	41
Figure 9. Le <i>Superflex</i> (SRI International) fonctionne avec des capteurs souples reliés à des moteurs par des câbles, le long d'un harnais et de bretelles textiles.	42
Figure 10. Classification des nouvelles technologies d'assistance physique, d'après un schéma de l'INRS (2017).	43
Figure 11. Quelques exemples d'exosquelettes conçus pour assister une partie spécifique du corps. Le modèle <i>Airframe</i> (Levitate), le modèle <i>Worker</i> (Exhauss), le modèle HAL (Cyberdyne) et l' <i>IronHand</i> (Bioservo).	44
Figure 12. Les deux versions du prototype : Exo A et Exo B.	45
Figure 13. a) Le ressort plat exerce une force maximum de 27 N en rotation autour du pivot, du bas vers le haut. b) Les ressorts plats (lames ressorts) fournissent une force progressive dans l'angle tronc-bras vers le haut, devant soi.	46

Figure 14. Principes mécaniques généraux de l'Exo A et B composés de ressorts plats (lames ressorts).	47
Figure 15. Représentation anatomique des groupes musculaires du haut du corps.	48
Figure 16. Enveloppe des mouvements 'possibles' (en vert), 'non recommandés' (en jaune) et 'pas atteignables' (en rouge). Modélisation d'après la brochure de SkelEx (SkelEx, Rotterdam, Netherlands).	48
Figure 17. Illustration des parties rigides et souples de l'Exo A (à gauche) et de l'Exo B (à droite).	49
Figure 18. La grille d'analyse RULA permet d'attribuer un score de pénibilité globale de la posture par observation (Morgan Maxwell, 2018).	56
Figure 19. Système d'enregistrement POLAR® RS800CX de la fréquence cardiaque composé d'une montre connectée à une ceinture abdominale.	58
Table 4. Matrice des critères d'évaluation principaux et de leurs moyens et ressources nécessaires.	61
Figure 20. Le modèle de l'acceptabilité, Nielsen (1993).....	64
Figure 21. Échelle de mesure du niveau de familiarisation Humain-Exosquelette. Un utilisateur certifié doit avoir un niveau minimum de 4.	70
Figure 22. Cycle itératif de la conception centrée utilisateur.	75
Figure 23. Diagramme représentant le protocole d'intégration de l'exosquelette qui est centrée autour d'une étape de simulation de la situation de travail. Les flèches en pointillé représentent le caractère itératif des étapes.	77
Figure 24. (a) Side view of the catamaran hull; (b) An operator is sanding the sealing edge. Hatches shows work zones for manual sanding.	85
Figure 25. Evolution of the heart rate for operator 1 during usual sanding process. The red curve indicates the evolution of heart rate. The frame on the right focuses on the second measure after a break of 17 minutes. This curve will allow to identify extreme heart beats and average data in the different levels of effort.	88
Figure 26. Evolution of heart rate for operator o2 during usual sanding process under the boat.	89

Figure 27. (a) Example for operator 5: histogram related to the curve, showing heart rate averages during sanding task under the boat; (b) Example for operator 5: evolution of heart rate during the related task.....	91
Table 5. Results of the study of heartrate measurements through various indexes.....	91
Figure 28. Profile of cardiac cost of related task for operators o3 to o6.	92
Figure 29. Process of identifying an adapted PAD for the observed postures. Hh = Hand height; sh = shoulder height. The PAD selected is a prototype of <i>SkelEx</i>	93
Figure 30. Evolution of operator o7 heart rate measured for the usual tasks wearing the PAD at first then without PAD.....	94
Table 6. Experiment 3: results of cardiac cost values for a comparative study on two operators.	95
Figure 31. a) Comparison of extreme heart rates for operator o7 and o8. With (w) PAD and without (wo) PAD. b) Comparison of RCC99 and cardiac cost averages.	95
Figure 32. Cardiac cost profiles for operator o7 and o8 for the two comparative phases with (acceptable) PAD and without (wo) PAD.....	96
Figure 33. Nielsen's (1993) model of system acceptability (M1).....	105
Figure 35. (a) Side view of the catamaran hull. (b) An operator is sanding the sealing edge. Hatches show the work zone for manual sanding.	108
Figure 36. Model M2 generated from literature application to case study and field study.	110
Table 7. Intermediate proposal of measurement methods for each acceptance factor (stage 3).	112
Figure 37. Final model (Mfinal) including new acceptance factors.	116
Figure 38. Product architecture and the mechanical principle of operation of the tested exoskeleton. Flat springs in the back apply a progressive strength upward.	130
Table 8. Experimental design for the two variables Exoskeleton and Familiarization protocol with two conditions (NoExo/Exo) and (F1/F2). The rows correspond to the first combination tested by the participants, the column to the second (for example, 6 participants tested first ExoB with protocol F1 (BF1), then ExoA with protocol F1 (AF1).	132
Figure 39. (a) A participant without the exoskeleton performing the repetitive task R and with the exoskeleton (b).	133

Figure 40. (c) A participant performing the precision task P without exoskeleton (a) and with the exoskeleton (b). Thickness of the pen was set up at 2.5mm (2.5 pixels).134

Figure 41. ACC*duration is the difference between Reference Heart rate (Hr) and average heart rate (Ha), expressed in beats per minute multiplied by task duration (min).135

Figure 42. Evaluation of ACC*d (acceptable) for Task R and task P with (Exo) and without (NoExo) exoskeleton. Errors bars indicate standard deviation and brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001).137

Figure 43. Evaluation of global and local perceived effort for specific parts of the body without (NoExo) and with Exoskeleton (Exo) for all tasks. Dotted lines indicate global strain means. Errors bars indicate standard deviation and brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001).139

Figure 45. Evaluation of donning/adjusting performance (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).141

Figure 46. Evolution of mean CCA*d (acceptable) for Task R and task P according to familiarization protocol (F1 or F2).142

Figure 47. Number of valid actions and errors committed for repetitive task R according to familiarization protocol (F1 or F2). Brackets indicate significant differences between F1 (manufacturer’s brochure) and F2 (expert tutorial) condition.143

Figure 48. Number of valid signs and errors committed for precision task P according to familiarization protocol (F1 or F2).143

Table 9. Descriptive statistics (mean, standard deviation, difference, p-value) and comparison of familiarization protocol (F1 or F2) on perceived benefits and acceptance dimensions (*p < .05).145

Figure 49. Product architecture and the underlying mechanical principles of the tested exoskeleton prototype.153

Figure 50. The task involves performing vertical assembling operations in arm-elevated posture.155

Figure 51. Spatial distribution of the Exo/NoExo conditions on the vertical plane. The operator was required to assemble metallic pieces on this asymmetrical vertical plane. The operator installed the pieces on each side either with (Exo) or without an exoskeleton (NoExo).156

Figure 52. ACC*d is the difference between Reference Heart rate (Hr) and Average Heart rate (Ha) expressed in beat/min multiplied by task duration (min).....	157
Table 10. Experimental design for the two variables, the exoskeleton and the familiarization protocol, with two conditions NoExo/Exo and F1/F2. The rows correspond to the first combination tested by the participants (for example, eight participants from Group 1 tested the NoExo condition first, and then the Exo condition with protocol F1).	158
Figure 53. Evaluation of ACC*d (acceptable) for the task with (Exo) and without (NoExo) exoskeleton. Errors bars indicate standard deviation, brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001).	160
Figure 54. Number of errors committed for the task. Brackets indicate significant differences between (Exo) and without exoskeleton (NoExo) condition. Errors bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant difference (ns = non-significant).	161
Figure 55. Evaluation of local perceived effort for specific parts of the body without (NoExo) and with Exoskeleton (Exo). Errors bars indicate standard deviation, brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001, ns: non-significant).	162
Figure 56. Average scores of perceived effects while wearing the exoskeleton (Exo). Error bars indicate the standard deviation. Dotted lines indicate the corresponding upper limit (6/10), lower limit (4/10), and t-test mark (5/10). Asterisks indicate significant difference (*p<0.05, **p<0.001, and ns: non-significant).	164
Figure 57. Evaluation of donning/adjusting performance (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).	166
Figure 58. Evaluation of global physical workload (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).	167
Figure 59. Evaluation of the number of errors committed according to familiarization protocol (F1 or F2). Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001).	168
Figure 60. Mean score differences between F1 and F2 in regards to perceived physical benefits. Asterisks indicate significant difference (*p < .05, **p<0.001, ns : non-significant).	169
Figure 61. Mean score differences for cognitive aspects and user acceptance between the F1 and F2 protocols.	170

Figure 63. Biplot of the PCA according to the first two principal components A1 and A2...	172
Figure 66. Représentation du travail de recherche pour l'interface du cobot mobile. D'après les tests utilisateurs, la sélection par deux points est trop complexe. Elle est remplacée par des zones et motifs facilement reconnaissables par les opérateurs. La jupe est la partie arrière de la coque.	193
Figure 67 : Extrait de l'analyse de la charge physique de travail.	226
Figure 68 . Algorithme d'extraction des verbatims pour l'étude des facteurs d'acceptation. Une mise à jour du facteur 'Utile pour la tâche' a été reformulée en 'Assiste la tâche'.	227
Figure 69. An operator with the exoskeleton (left) and without (right) is performing polishing activities.	230
Figure 70. Activities to be performed on boat: polishing window selection.....	232
Figure 71. Polishing activity on a kistler sensor following various postures, recording of the forces.	233
Figure 72. Movable cobot including Neoditech® system, UR10 equipped with Optoforce	233
Figure 73. An operator is manipulating the polishing system to learn the window to polish	234
Figure 74. The methodology applied to analyse the acceptance of the cobot and better integrate the system.....	235
Table 15. Factors and associated method to evaluate the perception of the movable cobot.	237
Une synthèse des résultats est présentée dans la Table 16.	252
Table. 16. Hypothèses principales liées aux spécifications.	253

Table des matières

AVANT-PROPOS.....	2
GLOSSAIRE	3
LISTE DES ILLUSTRATIONS	5
TABLE DES MATIERES.....	5
INTRODUCTION GENERALE	18
CHAPITRE 1	29
ÉTAT DE L'ART.....	29
1 L'humain au travail	31
1.1 L'activité humaine.....	31
1.2 Pénibilité et troubles musculosquelettiques (TMS).....	32
1.3 Quelques exemples de solutions d'assistance à l'opérateur	32
1.4 Les modes d'interaction avec les solutions d'assistance	35
2 Les exosquelettes	36
2.1 Marchés et applications	36
2.2 Typologies des exosquelettes	38
2.3 Présentation de l'exosquelette à l'étude.....	44
2.4 Participation au cadre normatif Humain-Exosquelette en construction	50
3 Conclusion.....	51
CHAPITRE 2.....	52
APPROCHES METHODOLOGIQUES	52
1 Étude des effets du port de l'exosquelette	54
1.1 Analyses ergonomiques préliminaires	54

1.2	Mesure de la performance et erreur humaine	58
1.3	Mesure de la perception de l'utilisateur	59
1.4	Synthèse des méthodes de mesure des effets du port de l'exosquelette ..	60
2	Étude de l'acceptation	63
2.1	Acceptabilité, acceptation et utilisabilité	63
2.2	Familiarisation et notions liées.....	67
3	Contribution aux méthodes de l'entreprise pour l'intégration d'un exosquelette	72
3.1	Le métier d'Intégrateur : émergence des méthodes	72
3.2	L'opérateur dans la conception industrielle	73
3.3	Formalisation d'un protocole itératif et participatif.....	76
4	Conclusion.....	77
CHAPITRE 3.....		79
ÉTUDE PRELIMINAIRE SUR L'IMPACT PHYSIQUE D'UN EXOSQUELETTE (ARTICLE CIRP)		79
1	Cas d'usage n°1 : tâches de finition sur coques de bateau	81
1.1	Analyse ergonomique de la situation initiale	81
1.2	Hypothèse d'un effet négatif sur la pénibilité globale	81
2	Conclusion du chapitre 3.....	99
CHAPITRE 4.....		100
ÉTUDE EXPLORATOIRE DES FACTEURS D'ACCEPTATION ET EXPERIMENTATION DE METHODES DE MESURES		100
1	Enjeux de l'étude	102
2.	Introduction	104
2.1	Context	104
2.2	Focus on acceptability	105

3	Method and Results	107
3.1	Overview of Model Development and Context for Case Study.....	107
3.2	Stage 1: Observe and analyse the occupational context	108
3.3	Stage 2: Obtain expert feedback & rephrase factors	110
3.4	Stage 3: Define measurement methods	111
3.4	Stage 4: Measure factors in field and laboratory tests	114
3.5	Stage 5: Final organization of factors	115
3.6	Stage 6: Generalization	117
4	Discussion	117
5	References	119
3	Conclusion du chapitre 4	122
	CHAPITRE 5	124
	MESURES DES EFFETS DE L'EXOSQUELETTE ET D'UN PROTOCOLE DE FAMILIARISATION	124
	PARTIE 1 (article HFES)	126
1	La notion de familiarisation	126
2	Objectifs de l'étude en laboratoire	126
3	Introduction	128
4	Materials and methods	129
4.1	Participants and ethics approval	129
4.2	Occupational exoskeleton	130
4.3	Familiarization protocol	130
4.4	Testing equipment	131
4.5	Design of experiments	131
4.6	Previous analysis of industrial tasks	132
4.7	Lab tests	132
4.8	Objective measurements	134
4.9	Subjective measurements	135

5	Data Analysis	136
6	Results	136
6.1	Study of exoskeleton effects on global physical workload	136
6.2	Study of exoskeleton effects on tasks performance	137
6.3	Subjective measures.....	138
6.4	Effects of familiarization protocol (F1/F2)	140
6.4.2	Perceptive results	144
7	Discussion and Conclusion	145
8	References	146
PARTIE 2 (article AE)		149
1	Étude expérimentale en situation réelle	149
1.1	Objectifs de l'étude.....	149
1.2	Constitution du groupe projet n°2	149
2	Introduction	151
3	Materials and methods	152
3.1	Participants and ethics approval.....	152
3.2	Occupational exoskeleton	152
3.3	Familiarization protocol.....	153
3.4	Testing equipment	154
4	Experimental design and procedure	154
4.1	Field task	154
4.2	Procedure	155
5	Objective measurements	156
5.1	Global physical workload	156
5.2	Tasks performance	157
5.3	Subjective measures.....	157
6	Design of experiments	158
7	Data Analysis	158

8	Results	159
8.1	Study of the exoskeleton effects	159
8.2	Subjective measures for Exo condition	161
8.3	Effectiveness of familiarization protocol (F1/F2) for Exo condition	165
8.4	Perceptive results for familiarization protocol	168
9	Discussion and Conclusion	173
10	Acknowledgements	175
11	Conclusion du chapitre 5	176
	CHAPITRE 6	177
	DISCUSSION GENERALE ET APPORTS POUR L'ENTREPRISE	177
1	Bénéfices d'un exosquelette	179
1.1	Bénéfices objectifs et perçus de l'assistance	179
1.2	Quelques points de vigilance	180
2	Apports sur l'acceptation et l'utilisabilité de la technologie exosquelette 181	
2.1	Bénéfices des études en situation d'usage	181
2.2	Apports méthodologiques concrets	182
3	Application des résultats : vers un protocole d'intégration	183
3.1	Processus et étapes principales de l'intégration	184
3.2	Proposition d'outils-supports pour accompagner les phases du projet	186
4	Quelques exemples concrets d'application	188
4.1	Adaptations pour favoriser l'intégration de l'exosquelette (Cas d'usage n°1, Bénéteau)	188
4.2	Mesurer l'adoption de l'exosquelette (cas d'usage n°2, Airbus Nantes).	189
4.3	Transfert de l'approche sur une autre technologie	191
5	Participation à la naissance d'une norme	194
5.1	Travail descriptif complémentaire au travail normatif	194
5.2	Partage des méthodes et outils :	194

6	Éthique et responsabilités des entreprises	195
6.1	Humain préservé vs homme augmenté	195
6.2	L'exosquelette reste un palliatif	196
6.4	Déroulé du travail de recherche en entreprise ..	Erreur ! Signet non défini.
8	Conclusion.....	196
	CONCLUSION GENERALE	198
	PRODUCTION SCIENTIFIQUE	203
	BIBLIOGRAPHIE.....	207
	GENERALE	207
	ANNEXES.....	223
	ANNEXE 1 - Analyses ergonomiques préliminaires – Extrait de l'analyse de la charge physique de travail.	224
	ANNEXE 2 - Extrait d'interviews- Méthode d'extraction des verbatims (mots clefs).	227
	ANNEXE 3 - Article IROS. Transfert de l'approche sur un robot collaboratif. .	228
	ANNEXE 4 - Grille d'observation : Exemple expérimentation terrain Airbus (2019).....	240
	ANNEXE 5 - Questionnaire d'évaluation Interaction Humain-Exosquelette.....	241
	ANNEXE 6 - Supports de familiarisation F1 (brochure) et F2 (tutoriel)	247
	ANNEXE 7 - Commentaires sur les différences entre Exo A et Exo B (extrait)	252
	FOLIO ADMINISTRATIF	255
	THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE CENTRALE DE NANTES	257

Introduction générale

Au cours du XXe siècle, les procédés industriels se sont modernisés par l'intégration de nouvelles machines (robots industriels simples et machines spécifiques), permettant la segmentation des opérations et l'accélération des cadences de production. Au sein de cette modernisation technologique qui a contribué à améliorer la performance industrielle, deux axes complémentaires se distinguent : le remplacement des tâches simples et répétitives autrefois réalisées par l'humain par des systèmes robotisés ou bien l'assistance à l'opérateur par des systèmes spécifiques, lorsque la complexité des tâches rend la robotisation trop difficile et trop coûteuse. En effet, la grande variabilité des tâches implique souvent une complexité technologique et des temps de développement importants pour des solutions qui demandent toujours la supervision d'un opérateur humain. La complexité de ces systèmes pose quelques problèmes, notamment une difficulté de personnalisation des fonctions (programmation) puisque la conception est généralement sous-traitée et réfléchie en dehors des cas d'usage réels. Les coûts de développement sont élevés et encouragent les entreprises à chercher de la main d'œuvre humaine moins chère ailleurs. De ce fait, la robotisation de certains métiers est plus lente et son intérêt est parfois même remis en question afin de préserver le savoir-faire humain lorsque cela est intéressant. Beaucoup de métiers industriels sont encore manuels, notamment dans les secteurs de la manutention, l'usinage, l'assemblage, et génèrent de la pénibilité au travail. L'apparition des exosquelettes se fait dans ce contexte, avec l'ambition de soulager la pénibilité des opérateurs tout en n'obstruant pas le savoir-faire humain. Ces dispositifs présentent certains avantages théoriques comme le soulagement physique pour les postures pénibles et replacent l'humain au cœur de l'activité industrielle. Cependant, l'arrivée de ces systèmes est très récente et leur intégration dans les entreprises se heurte à diverses barrières : on ne connaît pas leurs effets sur l'humain et son activité, ni les facteurs de son acceptation au sein de l'entreprise qui doit être réfléchie, comme toute introduction d'un nouvel outil. Par conséquent, on ne sait pas sur quels éléments s'appuyer pour favoriser la bonne intégration de ces systèmes.

Contexte de la thèse CIFRE

Le travail de thèse a été réalisé dans un premier temps en contrat avec l'entreprise GOBIO Robot (de Février 2017 à Novembre 2018) puis avec la filiale Gébé2 via un rachat par le

groupe Europe Technologies jusqu'en Mai 2019 puis avec une seconde filiale du groupe (Oratech Innovation) jusqu'à aujourd'hui. Les activités du groupe Europe Technologie se situent dans la modernisation des procédés industriels en France et à l'international. Entre 10 et 15% du chiffre d'affaire est consacré à la Recherche et Développement. Le groupe ayant récemment décidé de fusionner ses filiales, nous nommerons donc l'entreprise porteuse de la thèse 'la société Europe Technologies'. Au sein de cette nouvelle organisation, GOBIO est devenue une branche d'activité. Celle branche propose aux partenaires industriels des solutions d'assistance à l'opérateur. Elle travaille principalement à l'intégration d'exosquelettes et de systèmes d'assistance dédiés à des postures spécifiques aux tâches industrielles dans différents secteurs (aéronautique, logistique, agroalimentaire...). La société pense que la technologie exosquelette peut :

- **Préserver la santé des opérateurs** en les soulageant physiquement dans leurs tâches, et réduire les coûts importants liés à la pénibilité au travail,
- **Contribuer à l'augmentation de la diversité** (âge, genre) des opérateurs par la réduction de la pénibilité physique de tâches complexes et répétitives,
- **Contribuer à maintenir l'opérateur-expert au poste**, en complément des solutions robots et cobots en augmentation dans l'industrie.

Cependant, lors des premiers essais chez les partenaires, la satisfaction des utilisateurs n'était pas suffisante. Certains problèmes d'utilisation ont été constatés, notamment liés à des difficultés d'ajustement morphologiques et d'acceptation (refus d'utiliser le système). De plus, la méconnaissance des nouveaux systèmes instaurait une crainte chez les préventeurs et les organismes en santé du travail comme la CARSAT¹. En 2016, GOBIO lance son projet 'Exosquelette' afin de réfléchir aux contraintes révélées par ces premiers retours d'expérience. Alertés par ces premiers retours d'expérience négatifs mettant en valeur les limites de ces systèmes d'assistance physique en matière de conception, de méconnaissance des effets du port de l'exosquelette et d'acceptation, GOBIO souhaite alors proposer un sujet de recherche pluridisciplinaire qui aborderait à la fois une analyse des effets du port de l'exosquelette et une ingénierie des méthodes centrées sur l'humain. Afin de travailler sur ces axes de recherche, une thèse CIFRE² est proposée et s'organise avec des parties prenantes du monde académique et industriel (Figure 1).

¹ La CARSAT est la Caisse d'Assurance Retraite et de Santé Au Travail. Elle peut orienter les entreprises vers des solutions d'assistance à l'opérateur.

² Dispositif de thèse en contrat avec l'Association Nationale Recherche Technologie, une entreprise et un laboratoire.

Le laboratoire hébergeant la thèse est le laboratoire LS2N (Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes) avec les équipes nouvellement formées PACCE³ et RoMas⁴. L'équipe PACCE travaille sur des sujets de recherche en lien avec les champs de l'ergonomie cognitive, la psychologie, la conception centrée utilisateur et aborde des thèmes tels que la conduite autonome, la robotique médicale, la collaboration Humain-Machine. L'équipe RoMas contribue au développement des systèmes d'assistance industriels. Ces deux équipes sont engagées dans des projets de recherche communs afin de développer des solutions d'assistance centrées sur l'humain. L'accueil d'une doctorante au sein de l'entreprise permet notamment de participer à un groupe de travail pour la future norme NFX35A pour 'l'ergonomie de l'interaction Humain-Exosquelette' animée par l'AFNOR⁵. Ce groupe pluridisciplinaire composé de partenaires industriels, de laboratoires de recherche (dont l'INRS⁶) et de concepteurs échange régulièrement sur les problématiques liées à l'intégration des exosquelettes à travers la prévention, la conception ou les méthodes d'évaluation du système Humain-Exosquelette. Des visites de sites sont organisées et permettent notamment de se rendre compte des limites des différents modèles d'exosquelettes sur le marché. Les membres échangent leurs retours d'expérience dans un but de généraliser, de pair-à-pair, les bonnes pratiques de l'intégration d'un exosquelette en entreprise.

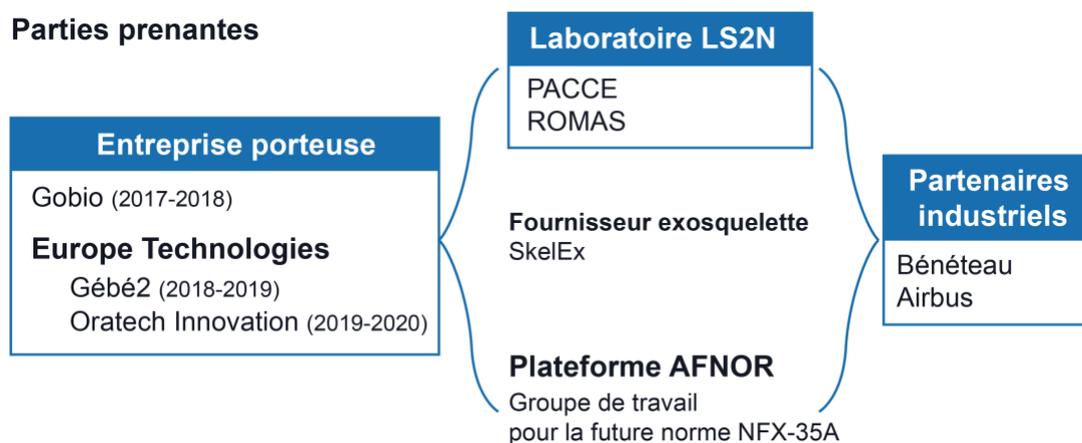


Figure 1. Organisation des parties prenantes engagées dans le travail de recherche.

³ Perception, Action, Cognition pour la Conception et l'Ergonomie.

⁴ Robots and Machine for Manufacturing, Society and Services.

⁵ Agence Française de Normalisation.

⁶ Institut National pour la Santé et la Sécurité au Travail.

Deux partenaires industriels ont été impliqués dans les expérimentations, le groupe Bénéteau⁷ et le groupe Airbus⁸ à Nantes. Enfin, les prototypes d'exosquelettes ont été fournis par notre constructeur partenaire *SkelEx* (SkelEx, Rotterdam, Netherlands). Le travail de recherche réalisé dans cette thèse aborde donc des verrous pluridisciplinaires et différents domaines scientifiques ont été mobilisés. Ils sont mentionnés dans la Table 1.

Table 1: représentation des domaines scientifiques sollicités en fonction des thématiques de recherche.

Thématiques de recherche	Domaines concernés
Évaluation des effets du port de l'exosquelette	Interaction Humain-Machine (perception et utilisabilité), Ergonomie de l'activité, Ergonomie physique
Étude de l'acceptation de l'exosquelette en entreprise	Interaction Humain-Machine (mesure de la perception et de l'utilisabilité), Expérience utilisateur, Ergonomie cognitive
Contributions aux méthodes de l'entreprise pour l'intégration	Recherche centrée utilisateur (recherche participative, conception centrée utilisateur)

Le champ de recherche de l'interaction Humain-Exosquelette va faire appel à des méthodes d'analyse ergonomique ou de *Human Factors Engineering* pour analyser l'activité de travail et traiter des notions d'efforts physiques et cognitifs. La mobilisation de connaissances permettant la conception de systèmes industriels intégrant les aspects cognitifs de l'interaction est également appelée ingénierie cognitive ou ingénierie des facteurs humains (Blanchais et al., 2018) qui est décrite comme le domaine qui doit garantir l'intégration dans les systèmes des contraintes liées aux utilisateurs finaux. Les méthodes d'évaluation sont nombreuses et trouvent leurs fondements théoriques dans les sciences humaines. Les questions d'acceptation des technologies sont traitées dans des champs connexes comme la psychologie sociale et l'ergonomie cognitive (Brangier et al., 2010).

⁷ Acteur mondial des industries nautiques et des habitats de loisirs.

⁸ Coopération industrielle internationale. Leader mondial du secteur de l'industrie aéronautique.

En ingénierie industrielle, les approches de conception centrées sur l'utilisateur abordent les contraintes de perception de l'utilisateur et proposent de l'intégrer en amont dans les études. Plus récemment, le champ de la recherche utilisateur issue des sciences informatiques (Interaction Homme-Machine) propose des méthodes d'évaluation de l'expérience utilisateur basées sur l'utilisabilité.

La thèse étant en collaboration avec une entreprise, les travaux devront se positionner sur l'analyse de cas réels et produire des livrables dédiés aux intégrateurs et concepteurs de solutions. Deux cas d'étude industriels ont été le support des travaux.

Cas d'étude n°1 : opérations de finitions sur coques de bateaux (Groupe Bénéteau). Où les opérateurs réalisent des tâches 'bras levés' de ponçage et polissage sur des coques de grands catamarans. Les expérimentations ont été réalisées en collaboration avec une équipe du groupe Bénéteau à Dompierre/Yon (Vendée).

Cas d'étude n°2 : opérations d'assemblages de pièces aéronautiques (Groupe Airbus). Où les opérateurs réalisent des tâches 'bras levés' d'assemblage de grandes pièces métalliques sur un plan vertical. Les expérimentations ont été réalisées en collaboration avec une équipe du groupe Airbus à Nantes.

Problématiques et enjeux de la recherche

Enjeux économiques liés à la santé

L'utilisation des exosquelettes est considérée comme une solution potentiellement intéressante pour soulager la pénibilité au travail et pour réduire les coûts liés aux troubles musculosquelettiques (TMS). Une étude récente estime que 42% des cas signalés de TMS concernent le haut du corps. En France, ces troubles sont considérés comme la première cause d'arrêts de travail, ce qui explique les coûts relatifs estimés en 2012 à 10 millions de journées de travail et un milliard d'euros de frais couverts par les cotisations d'entreprises (INRS, 2011). Une étude d'analyse du besoin en interne confirme cette tendance au sein du réseau de nos partenaires. L'utilisation des exosquelettes peut s'avérer plus intéressante qu'une assistance robotisée sur les tâches complexes puisqu'une machine spécifiquement développée pour la complexité d'une opération implique un coût très important. Il peut être également avantageux dans certains cas de maintenir l'opérateur-expert à son poste.

Enjeu social : la préservation du savoir-faire humain

Certaines tâches simples et répétitives nécessitent peu de capacités cognitives et sont facilement réalisables par des robots industriels. Cependant, il peut être intéressant pour certaines applications de pouvoir garder, 'l'œil humain', son savoir-faire technique (ex : finitions de haute qualité) et sa grande capacité d'adaptation aux aléas en production. Ainsi l'exosquelette peut être considéré non pas comme une nouvelle machine spécifique mais plutôt comme un prolongement de l'humain, il ne remplace pas l'humain.

Enjeux sur la connaissance et les effets des exosquelettes

Depuis 5 ans environ, les premiers essais se font de manière confidentielle en France sur les chaînes d'assemblage du secteur automobile. La première génération d'exosquelettes est jugée trop lourde, trop encombrante, peu adaptée à la variabilité morphologique et aux besoins des opérateurs. Pour ajouter à ces problèmes de conception, la méconnaissance des effets du port de ce nouveau système fait peur aux préventeurs et acteurs en santé. Finalement, même si la fonctionnalité est reconnue, la volonté d'utiliser le système est faible et met en valeur une barrière d'acceptation qu'il faut explorer. Lorsqu'elles tentent d'évaluer ces dispositifs, les entreprises font face à un très large panel de méthodes d'évaluation ergonomiques traditionnelles, mais ne savent pas quels critères d'évaluation sont importants et les études coûtent cher. On peut alors questionner la pertinence des méthodes d'évaluation classiques basées sur l'analyse de la charge physique, puisque la perception de la charge est modifiée ainsi que la méthode de l'analyse posturale, car l'utilisation de l'exosquelette ne modifie pas visiblement la posture, elle l'assiste. Dans cette thèse, nous essaierons de questionner les méthodes d'évaluation en considérant un nouveau système Humain-Exosquelette-Outil dans son environnement de travail.

De ce fait, deux grandes problématiques sont posées :

- Quantifier et qualifier l'apport d'un exosquelette industriel, et plus globalement l'interaction Humain-Exosquelette ?
- Identifier et mesurer les facteurs d'acceptation liés à l'usage de l'exosquelette ?

Objectifs des travaux

Afin de répondre à ses problématiques, les objectifs de la recherche ont été définis comme ceci :

1° Identifier et mesurer les facteurs d'acceptation en lien avec le contexte d'usage

Ceci passe par la réalisation d'une étude exploratoire qui permette de modéliser les facteurs d'acceptation d'un exosquelette sur un cas d'usage spécifique puis de les confronter à notre réseau d'experts (Afnor, experts industriels...)

2° Évaluer les effets du port de l'exosquelette sur la pénibilité, la performance, les bénéfices perçus et l'acceptation des opérateurs

Il s'agit d'étudier, proposer et expérimenter des méthodes de mesures simples, accessibles et facilement duplicables pour les acteurs d'un projet 'exosquelette' au sein du réseau industriel. L'étude des effets doit permettre au projet de recherche de progresser. Il est en effet nécessaire d'avoir des preuves concrètes des bénéfices de l'usage de l'exosquelette et surtout de valider que son utilisation ne soit pas dangereuse pour les futurs utilisateurs.

3° Contribuer au développement d'un protocole d'intégration (axe applicatif pour l'entreprise)

C'est un objectif transversal de l'entreprise. Les résultats des deux premiers axes de recherche doivent permettre de proposer une méthode de référence pour l'intégration d'un exosquelette industriel. Ce 'protocole d'intégration' peut être associé à des outils tels que : échelles de mesure, grilles d'évaluation, questionnaires. A la fin de la thèse, nous devons avoir validé des protocoles avec les partenaires (questionnaires, critères d'évaluation) et la personnalisation de ces protocoles de test pour certains.

Contributions

Étudier l'acceptation de l'exosquelette

Afin d'identifier et de mesurer les facteurs d'acceptation concernant l'exosquelette industriel, une approche participative en situation réelle est introduite. Concernant l'aspect psychométrique, des analyses de l'activité et tests d'utilisabilité sont réalisés et des questionnaires sont spécifiquement créés.

Évaluer les effets du port de l'exosquelette

Une approche expérimentale pour la quantification et la qualification d'un exosquelette industriel a été proposée, elle inclut : la rédaction des protocoles, la conception des supports expérimentaux, la

*réalisation des mesures et l'analyse des résultats. Objectif transversal :
Contribution au développement d'un protocole d'intégration*

Une première version de protocole d'intégration est proposée à nos partenaires industriels. Il est testé en interne par notre service commercial certifié en prévention. Ce protocole inclut un plan de formation avec des supports dédiés dont un tutoriel 'expert' destiné à optimiser la familiarisation des futurs utilisateurs, ainsi que différents outils dont une échelle de niveau de familiarisation, un questionnaire et une grille standard de mesure de l'expérience utilisateur. Les résultats des deux premiers axes de recherche permettront d'expérimenter ce protocole, de mesurer l'efficacité du tutoriel 'expert' et de valider la nécessité d'un tel programme.

Déroulé du travail de recherche en entreprise

La Figure 2 ci-dessous représente notre démarche de réflexion et les étapes marquantes de l'entreprise. Un des aspects importants de ce travail est la progression itérative des problématiques de recherche en fonction des connaissances acquises par les expérimentations.

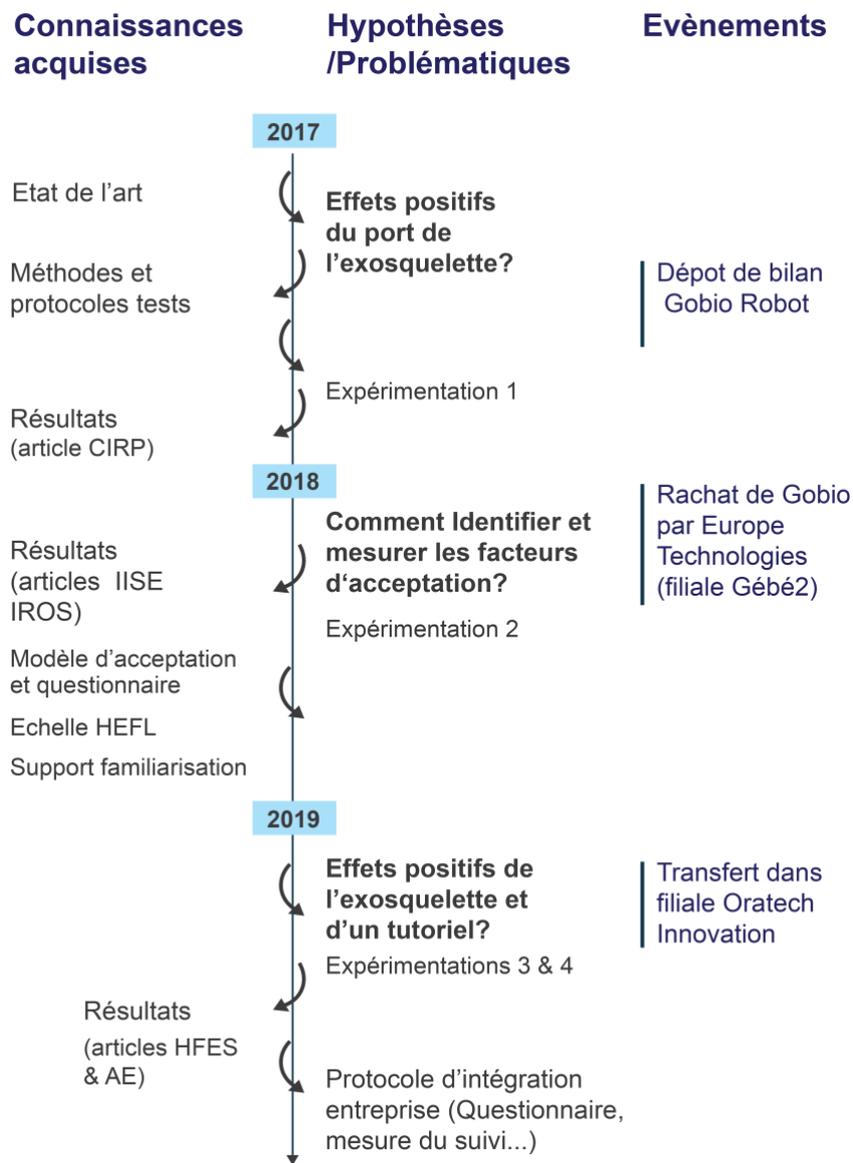


Figure 2. Représentation chronologique des connaissances acquises au cours des expérimentations en lien avec les problématiques de recherche, en parallèle des évènements marquants de l'entreprise.

Ce travail de doctorat a conduit à une production scientifique d'articles en conférences et en revues internationales. La Table 2 présente une synthèse des articles rédigés (et en soumission) en fonction des objectifs principaux du travail de recherche.

Table 2 : Répartition des articles dans les chapitres en fonction des objectifs de recherche.

	Article CIRP ⁹ Chapitre 3	Article IISE ¹⁰ Chapitre 4	Article HFES ¹¹ Chapitre 5	Article AE ¹² Chapitre 5	Article IROS ¹³ Annexe 3
Évaluer les effets du port de l'exosquelette	☑		☑	☑	
Identifier et mesurer l'acceptation de l'exosquelette		☑	☑	☑	☑

⁹Conférence internationale avec actes. CIRP est l'acronyme pour : Collège International pour la Recherche en Productique.

¹⁰ Revue internationale. IISE est l'acronyme pour : Institute of Industrial and System Engineers

¹¹Conférence internationale avec actes. HFES est l'acronyme pour : Human Factors and Ergonomics Society.

¹² Article en soumission. Revue internationale. AE est l'acronyme pour : Applied Ergonomics.

¹³ Conférence internationale avec actes. IROS est l'acronyme pour : International Conference on Intelligent Robots and Systems.

Organisation du manuscrit

Afin d'exposer le contenu des travaux, nous avons choisi de rédiger ce manuscrit sous forme de thèse sur articles : chaque article est présenté in extenso dans le chapitre dédié, et est encapsulé entre une introduction et une conclusion en français. Le plan du manuscrit est structuré comme suit.

Dans le **chapitre 1**, nous proposons de parcourir un état de l'art étendu sur la genèse des exosquelettes. Nous commencerons par la présentation du contexte industriel de la pénibilité au travail dans lequel apparaissent les exosquelettes puis introduirons la notion d'assistance à l'opérateur à travers plusieurs exemples. Le système Humain-Exosquelette

sera défini et modélisé, une classification des exosquelettes sera présentée et quelques cas d'applications industriels seront donnés. Enfin, l'exosquelette à l'étude sera présenté plus en détail.

Le **chapitre 2** présentera les fonctions du métier d'intégrateur et abordera les bases méthodologiques étudiées et employées dans les travaux de recherche.

Une étude préliminaire des effets du port de l'exosquelette est réalisée dans le **chapitre 3**. Dans cette étude, une méthode d'analyse physiologique est expérimentée sur le cas d'étude n°1 (finitions sur coques de bateaux) dans le but d'évaluer l'effet de l'exosquelette sur la pénibilité globale des opérateurs ([article CIRP](#)).

Le **chapitre 4** ([article IISE](#)) présentera une approche écologique et participative pour l'identification et l'évaluation des facteurs d'acceptation qui seront modélisés. Cette étude exploratoire présentera des méthodes de mesures simples et non intrusives pour la situation de travail industrielle.

Dans le **chapitre 5** ([article HFES et AE](#)) une analyse plus détaillée des variables étudiées sera présentée sur un second cas d'usage n°2 (assemblage de pièces aéronautiques). Les effets du port de l'exosquelette ainsi que des supports de familiarisation seront étudiés. Une expérimentation en laboratoire ainsi qu'une seconde en situation réelle montreront d'autre part l'apport globalement positif du moyen d'assistance, et l'intérêt de la démarche expérimentale proposée.

Enfin, dans le **chapitre 6** nous concluons sur les apports de la thèse pour l'entreprise et leurs perspectives d'applications en conception industrielle. Nous proposerons de formaliser plus en détail un protocole d'intégration et les différentes étapes de ce protocole seront illustrées par des exemples concrets. L'article mentionné dans ce chapitre ([article IROS](#)) se trouve en version complète dans les annexes (annexe 3). Il ne représente qu'une étude secondaire dans la thèse et illustre le transfert de la démarche sur une autre technologie d'assistance.

Enfin, Nous concluons par une réflexion générale sur les travaux de recherche et proposerons de nouvelles perspectives d'évaluation et de conception des exosquelettes industriels.

Chapitre 1

État de l'art

Dans ce premier chapitre, nous nous intéresserons d'abord à l'humain au travail dans un contexte d'intégration d'une assistance pour réaliser les tâches industrielles.

Nous nous appuyerons sur l'ergonomie de l'activité pour expliquer le concept d'activité humaine et les dimensions liées à l'étude. Nous décrirons le 'système Humain-Exosquelette' pour lequel nous proposons une définition, une modélisation et une classification.

Nous citerons quelques cas d'applications industriels puis l'exosquelette à l'étude sera présenté en détail.

Enfin nous formulerons nos problématiques en lien avec cet état de l'art.

1 L'humain au travail

1.1 L'activité humaine

Le développement et la modernisation des tâches industrielles modifient l'activité humaine, définie par un enchaînement de toutes les actions d'un travailleur au sein d'un système de travail (Norme⁹ NF EN 614-1+A1, 2009). En ergonomie de l'activité, Guérin et al. (1991) placent l'activité de travail au centre de l'entreprise dont les déterminants sont soit liés à l'opérateur soit liés à l'entreprise. L'opérateur est représenté comme un régulateur de l'activité, entre ce qui influe sur lui (santé, sécurité...) et les contraintes imposées par l'entreprise (performance, méthodes, productivité, standard de qualité...). Pour (Hubault, 1995), l'activité de travail correspond aux régulations que mettent en œuvre les opérateurs pour gérer les variations du système technique afin d'assurer la production. De cette manière, l'opérateur s'adapte en continu pour faire face aux différentes variabilités de l'activité, comme la présence croissante des systèmes robotiques due à la modernisation des procédés industriels. Les robots industriels sont des machines simples ou spécifiques dédiées à la réalisation de tâches répétitives auparavant réalisées par l'humain. L'humain se retrouve de plus en plus fréquemment en cohabitation avec ces machines qu'il doit superviser, souvent pour la réalisation de tâches simples (déplacement de charge, picking...) et reste l'expert des opérations difficilement réalisables par des machines (opérations complexes ou demandant beaucoup de précision). L'humain opère donc des régulations de ses fonctions (physiologiques, psychologiques...) dans ce contexte où la performance humaine s'adapte à la performance technique. Ainsi, l'automatisation et la spécialisation des opérations déséquilibrent le processus de régulation humain et peuvent entraîner des troubles sur la santé comme les troubles musculosquelettiques causés notamment par la répétitivité des gestes, comme l'expliquent Bourgeois et Hubault (2005) et Ouellet et Vézina (2008).

Dans le champ de l'ergonomie de l'activité, Darses et de Montmollin (2006), proposent que l'étude de l'activité humaine prenne en compte différentes dimensions du comportement, liées à la réalisation de l'activité (gestes, paroles...). L'activité humaine regroupant les activités physiques (gestes, postures, déplacements, efforts...), mentales (décision, choix), sensorielles (prise d'informations...). Ces dimensions pouvant être modifiées lors d'un changement sur la situation de travail comme l'introduction d'une nouvelle technologie par exemple.

⁹ la Directive ISO/CEI (2004) définit une norme comme un « document établi par consensus et approuvé par un organisme reconnu, qui fournit, pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d'ordre optimal dans un contexte donné ».

1.2 Pénibilité et troubles musculosquelettiques (TMS)

La pénibilité au travail est devenue un enjeu important ainsi qu'une responsabilité des entreprises via le compte professionnel de prévention (C2P) qui les oblige à déclarer les facteurs de risques. Le Code du travail mentionne à l'article D 4121-5 les facteurs de pénibilité au travail dont la répétitivité des gestes et le port de charges dont il fixe des limites acceptables, en fonction des caractéristiques individuelles (âge, genre, distance à parcourir). Ces facteurs de pénibilité sont considérés comme des facteurs de risques pour le développement des TMS. L'institut pour la santé et la sécurité au travail (INRS) définissent les TMS comme des troubles de l'appareil locomoteur pouvant entraîner des douleurs, une perte de force, et dans certains cas un handicap irréversible. Ils sont le résultat de la combinaison de multiples causes liées au poste de travail et à son environnement et constituent depuis plus de 20 ans la première maladie professionnelle reconnue en France et en Europe (INRS, 2011). À ce titre, ils sont répertoriés dans le Tableau 57 du régime général (Roquelaure & Touranchet, 2011). Pour répondre à cette problématique, ergonomes et ingénieurs travaillent à la conception de solutions pour adapter les situations de travail afin de rétablir la régulation des contraintes subies par l'opérateur. On parle de 'systèmes d'assistance à l'opérateur'.

1.3 Quelques exemples de solutions d'assistance à l'opérateur

Lorsque la situation de travail est sujette à des contraintes physiques trop importantes, l'entreprise peut faire appel à un ergonome pour évaluer la situation de travail et établir des recommandations. Dans le processus d'intervention ergonomique 'classique', un cahier des charges est ensuite fourni au bureau d'études qui propose des concepts pour répondre aux besoins puis la solution est conçue après des phases d'essais, prototypage et validation en situation réelle. L'industrie moderne a vu se développer différents systèmes de soutien aux

opérateurs, de complexité variable tels que : porte-outils, cobots (robots collaboratifs) ou robots.

1.3.1 Robot industriel et machine spécifique

Un robot industriel ou 'machine spécifique' est un système automatisé décrit dans la norme NF ISO 8373 (2012) comme un manipulateur, multi-application, reprogrammable, commandé automatiquement, programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle. Il existe différents types de robots qui varient selon des critères de précision, capacité de charge, mobilité/amplitude, et selon leur architecture : rigides, flexibles, parallèles à câbles. L'intégration d'un robot industriel inclut une interface physique à l'opérateur (actionneur et système de commande) et logicielle (communication). L'ensemble incluant tous les éléments liés à l'utilisation (socle, dispositif de sécurité) est appelé 'cellule robotisée'.

1.3.2 Cobot ou robot collaboratif

Un cobot industriel est un système automatisé collaboratif. Ce terme récent est un néologisme issu de la contraction du mot 'coopération' et 'robotique', proposé par deux professeurs à la Northwestern University et est initialement utilisé pour désigner des dispositifs d'assistance physique passifs qui guident les opérateurs. Colgate et Peshkin (Colgate et al., 1996) le définissent comme « robot conçu pour une interaction directe avec un opérateur humain, dans un espace de travail partagé ». On parle aussi de 'robot d'assistance'. Il se différencie principalement du robot industriel par la volonté de simplifier sa programmation, puisqu'il est piloté continuellement ou ponctuellement par l'humain, par sa flexibilité, car il est conçu pour une manipulation humaine et par conséquent un nombre restreint d'enceintes de sécurité. La Figure 3 montre un porte-outil pneumatique ou 'bras zéro gravité' qui évite à l'opérateur de subir les contraintes physiques liées à la manipulation d'un objet lourd (jusqu'à 25kg). Dans cet exemple, la manipulation est en interaction 'directe' ou 'réelle' et l'opérateur reste en contrôle des opérations.



Figure 3. Un 'bras zéro gravité pneumatique' (Europe Technologies, 2019) aide l'opérateur à positionner une pièce lourde avec un effort très faible.

1.3.3 Nouveaux arrivés : les exosquelettes

Si l'objectif principal des systèmes collaboratifs (bras zéro gravité, cobots) est de réduire la pénibilité au travail en déportant les efforts sur la machine, ils permettent aussi de replacer l'humain au cœur des procédés en lui laissant les tâches à plus forte valeur ajoutée. En revanche, la robotisation, même partielle, des procédés peut-être très couteuse et ne permet pas l'automatisation complète des tâches. Il existe également des situations où le savoir-faire technique humain doit être préservé. Ces contraintes favorisent à l'apparition de systèmes d'assistances moins chers pour les entreprises comme les exosquelettes (l'écart de prix entre un exosquelette et un robot peut dépasser 100 000 euros), qui sont en pleine expansion dans le secteur industriel (Coralie Baumard, 2017). Les exosquelettes ou 'dispositifs d'assistance physique' (DAP) visent à soulager les efforts produits par les travaux manuels et sont en interaction directe avec l'opérateur, et donc indirecte avec l'outil ou la charge portée par les mains de l'opérateur. Par leurs modes d'interaction différents, ces solutions offrent un service complémentaire à l'opérateur. En effet, nous pouvons par exemple imaginer ceci : pendant qu'un robot transporte une pièce lourde vers le poste de travail, un cobot peut ensuite saisir cette pièce et l'orienter, l'opérateur peut ensuite assembler de petits éléments sur cette pièce et contrôler la qualité de l'assemblage. Pour cette dernière étape, il pourrait utiliser un exosquelette pour soulager le maintien de sa posture. Ces solutions complémentaires peuvent être analysées selon différents modes d'interaction. Ces solutions ont donc des modalités d'assistance différentes (niveaux d'interaction, autonomie) et sont généralement intégrées de manière complémentaire. En

effet, la grande variabilité des tâches industrielles et le manque d'ergonomie de certains systèmes ne donnent pas aux opérateurs de solution 'parfaite' et les entreprises doivent souvent combiner plusieurs solutions d'assistance. Une des missions stratégiques des concepteurs est donc de développer une ingénierie globale centrée sur l'utilisateur, régulateur de la situation de travail, afin d'harmoniser l'intégration de ces systèmes d'assistances.

1.4 Les modes d'interaction avec les solutions d'assistance

Les solutions d'assistance sont régies par différents modes d'interaction (interface), différents niveaux d'autonomie et de modes de coopération. Les interfaces peuvent contenir différents types d'éléments comme des éléments physiques (poignées, interfaces tactiles, boutons, retour haptique), visuels (écrans), sonore (commande orale) voir même plus récemment d'interactions par les mouvements en réalité virtuelle (Goodrich & Schultz, 2007). Dans notre cas, un exosquelette passif (uniquement animé par l'énergie de l'utilisateur) n'implique que le mode d'interaction physique avec l'humain. Cela signifie que les aspects physiques (confort, gêne physique, liberté de mouvement) seront certainement importants à considérer dans l'évaluation des effets du port de l'exosquelette. Parmi les différentes solutions d'assistance, nous retrouvons plusieurs types de collaborations comme la téléopération, le contrôle collaboratif ou comanipulation (Helms, E., Schraft, R., & Hagele, M., 2002). L'action avec l'opérateur peut être indépendante, synchronisée, simultanée sur la même pièce ou bien assistée et effectuant le même procédé sur la même pièce. (Lee & Seppelt, 2012) proposent de concevoir les modes de coopération par l'allocation de fonctions tenant compte des capacités intrinsèques des humains et des machines et Boy (2011) selon la compréhension mutuelle Humain-Machine. Dans la littérature, un grand nombre de recherches en ergonomie cognitive relatent de la difficulté de cette coopération (Billings, 2018; Parasuraman et al., 1996) et relèvent la complexité d'interfacer des systèmes d'assistance complexes avec l'humain. La coopération avec un exosquelette aussi appelée Exomanipulation est décrite comme la manipulation d'une structure externe au corps humain par l'humain lui-même. L'interface étant uniquement physique et directement en contact avec le corps humain, cela peut représenter un niveau d'interaction relativement 'intrusif' avec lequel l'humain doit s'accommoder pour interagir avec son environnement de travail. Nous allons nous pencher plus précisément sur ce mode de collaboration en modélisant l'interaction Humain-Exosquelette (Figure 4). Enfin, concernant l'autonomie des exosquelettes, la gestion des sources d'énergie est un problème majeur dans la conception

des exosquelettes actifs. L'exosquelette étudié dans ce travail étant un système passif, nous ne développerons pas plus ce point.

2 Les exosquelettes

Revêtus par les opérateurs pour les assister dans leurs situations de travail, les exosquelettes ont été conçus pour limiter ou remplacer l'effort physique impliqué dans la réalisation de la tâche (Roguelaux & Touranchet, 2011). Si les premiers prototypes d'exosquelettes voient le jour en Europe au XIVe siècle avec les armures articulées, il faudra attendre les années 1960 pour voir le premier exosquelette industriel aux États-Unis. Cet exosquelette baptisé *Hardiman* (Figure 4) conçu pour le port de charge était robotisé et capable de supporter plus de 600 kg. L'émergence de prototypes fonctionnels se voit surtout dans le secteur militaire puis dans le secteur médical, avec des applications de port de charges principalement.



Figure 4. Un des premiers exosquelettes industriels. Hardiman, General Electric, 1965.

2.1 Marchés et applications

Dans les années 2000, les constructeurs se multiplient en Europe et au Japon, les recherches portant principalement sur des technologies robotisées. Aujourd'hui, le

développement des exosquelettes est étendu globalement dans le monde entier avec plus de 40 constructeurs (laboratoires de recherche inclus) et un marché mondial en forte croissance, estimé à 2.6 millions d'unités selon le cabinet d'intelligence stratégique ABI Research (Dan Kara, 2016) et concerne des applications militaires, médicales ou industrielles. Dans le secteur médical, des exosquelettes motorisés (actifs) tels que LOPES (Veneman et al., 2007) ou eLegs (Strausser, K.A., & Kazerooni, 2011) sont utilisés pour la réhabilitation des patients. Dans le secteur industriel, de nombreux postes difficiles à robotiser, notamment pour des raisons d'exiguïté des espaces de travail, représentent des applications potentielles pour les exosquelettes. Depuis 2016, la branche d'activité GOBIO du groupe Europe Technologies travaille à l'intégration des exosquelettes sur des applications variées, principalement pour la logistique (manipulation, chargement/déchargement, contrôle de pièces), la préparation de surface (peinture, ponçage...) et des opérations d'assemblage (vissage, rivetage, soudage...). Face aux difficultés d'intégration en milieu industriel liées principalement au poids, à la taille et à l'encombrement des solutions motorisées, une deuxième génération d'exosquelettes apparaît en parallèle au début des années 2010 comme les 'exovestés' de Bionics (Bionics, USA) et de *Ske/Ex* (SkelEx, Rotterdam, Netherlands) par exemple. Ces dispositifs plus légers et moins encombrants suscitent un intérêt croissant auprès des industriels. Les types d'exosquelettes sont donc nombreux : nous allons clarifier leurs typologies après avoir modélisé l'interaction Humain-Exosquelette, puis présenter l'exosquelette à l'étude. Enfin,

Modélisation de l'interaction Humain-Exosquelette industriel

La modélisation permet de schématiser et expliquer le concept d'un système. Les représentations de l'interaction Humain-Machine dans le cadre de l'assistance industrielle font apparaître l'humain comme élément externe à la machine (Helms et al., 2002). La machine étant un élément flexible qui agit de manière directe sur l'humain et le procédé, tout en captant des informations des deux parties (Figure 4, a). La modélisation de la relation entre l'humain, l'exosquelette et le procédé pourrait être différente sur plusieurs aspects, elle est schématisée Figure 5, b). D'abord, l'exosquelette n'est pas déporté mais en exomanipulation comme expliqué dans la section 1.4, ce qui implique une relation indirecte de l'humain au procédé, et de plus par l'intermédiaire d'un outil, absent dans la collaboration Humain-Robot car c'est le robot qui possède l'outil. Enfin, il nous semble important de mentionner l'environnement qui peut agir directement sur le système Humain-Exosquelette

(espace exigu, poussière...) et sur le procédé. En effet l'environnement peut être modifié par l'utilisation de l'exosquelette (déplacements des outils, changement des méthodes).

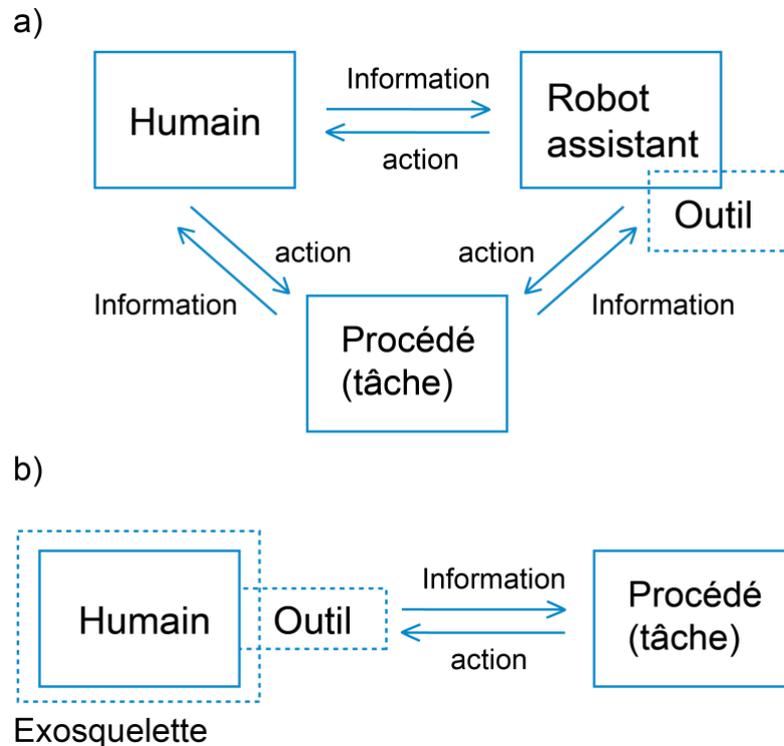


Figure 5. a) Représentation schématique de la collaboration Humain-Machine (Robot assistant) proposée par Helms et al, (2002) ; b) Proposition de schéma de la collaboration Humain-Exosquelette. Ces interactions interviennent dans un environnement de travail.

2.2 Typologies des exosquelettes

2.2.1 En fonction du type d'actionneur

Les exosquelettes peuvent se distinguer de plusieurs manières : par exemple selon leur type d'énergie, de commande, la posture ou partie du corps ciblée par l'assistance. La distinction la plus employée par les industriels est celle qui distingue un système actif (qui fait appel à une source d'énergie externe) et un système passif (sans source externe d'énergie), fonctionnant par la déformation d'une structure souple (ressort, élastique). Les exosquelettes actifs, également appelés robots d'assistance physique (RAP) sont en général très lourds (15 à 20 kg) et encombrants, comme celui développé par RB3D avec le commissariat à l'énergie atomique (CEA) pour permettre aux soldats de porter de plus lourdes charges (RB3D, 2014). Ils sont plutôt envisagés dans le secteur militaire ou médical

(Dan Kara, 2016). Parmi eux, on distingue principalement un type d'actionnement électrique (55% du marché en 2016, Grand View Research, 2018) qui utilise des moteurs électriques et des batteries, ou hydraulique, qui utilise des actionneurs hydrauliques très puissants mais requièrent une source d'énergie importante comme les piles à combustible, pneumatique, comme le modèle Innophys (Innophys CO, LTD) représenté en Figure 6.



Figure 6. L'exosquelette pneumatique Innophys (Innophys CO, LTD), 2018.

Ces derniers sont intéressants en termes de réduction de poids mais des limites importantes freinent le développement de ces systèmes, notamment la complexité des d'articulations, la gestion de la variabilité en pression et l'autonomie en énergie. L'opérateur doit alors rester près d'une source d'air comprimé ou la porter sur lui ce qui alourdit le système. Malgré les progrès techniques sur la miniaturisation des éléments (articulations mécaniques, moteurs, batteries..), il est encore difficile d'envisager un exosquelette actif qui soit léger et peu encombrant. Pour cette raison, les industriels se sont tournés vers des solutions plus simples, assistant plutôt une partie du corps et n'ayant pas besoin d'apport externe d'énergie.

2.2.2 En fonction de leur application

On trouve une variété d'applications parmi les exosquelettes (médicale, personnelle industrielle.). Si dans le secteur militaire, ces systèmes sont principalement conçus pour permettre aux soldats de porter des charges très lourdes, on trouve dans le secteur médical des objectifs d'assistance à la personne (pour déplacer les patients par exemple) mais

surtout de réhabilitation (bras robotisés, aide à la marche). C'est le cas de l'exosquelette développé par l'ingénieur Jacob Rosen (Figure 7) présenté lors d'une démonstration au Consumer Electronic Show (CES) 2019. En général les structures des exosquelettes actifs sont composées de plusieurs moteurs distants du corps et sont assez encombrantes comme on peut le voir sur la figure. Leur intégration dans l'industrie va probablement demander encore de nombreuses années pour les alléger et réduire leur volume (Dan Kara, 2016).



Figure 7. Un exosquelette actif dédié à la réhabilitation médicale au CES, 2019. Image récupérée sur le blog Forbes (2019).

Le secteur industriel expérimente de plus en plus d'exosquelettes sur des postes où il est nécessaire de porter une charge assez lourde (> 10kg) sur des distances courtes ou de maintenir une posture 'bras levés' pendant longtemps, par exemple lors des opérations de vissage sous caisse dans le secteur automobile. On peut citer par exemple le modèle Airframe de Levitate Technologies Inc., développé avec la société BMW pour soulager des opérations répétitives avec les bras aux dessus des épaules (Levitate Technologies). Ou bien l'exosquelette SHIVA (Figure 8) développé par la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer) en 2019 pour des opérations de maintenance répétitives bras levés.

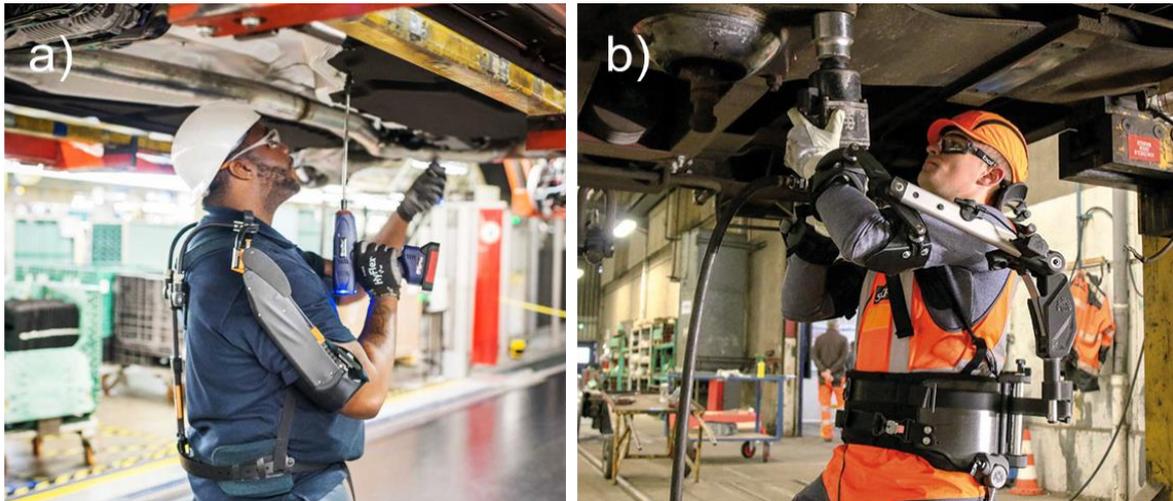


Figure 8. a) : Un opérateur teste l'exosquelette Levitate Airframe (Levitate Technologies) sur un site de BMW¹⁰, 2018 b) : L'exosquelette Shiva développé par la SNCF, 2018.

2.2.3 En fonction de leur structure

Si les premiers exosquelettes étaient essentiellement **rigides** et assemblés par des articulations mécaniques complexes et robustes, certains laboratoires développent des exosquelettes **souples** (ou *exovest*, *exosuits*¹²) en étudiant la possibilité d'utiliser des actionneurs souples comme des vérins textiles ou 'muscles artificiels' par exemple. Parmi ces exosquelettes souples, nous pouvons citer le *Superflex* de l'organisation SRI International représentée dans la Figure 9. Ce système développé par le Harvard BiodesignLab¹¹ utilise des capteurs souples et des moteurs miniatures reliés à des câbles pour assister le mouvement de la marche.

¹⁰ Constructeur automobile allemand d'automobiles haut de gamme.

¹¹ Division de recherche pluridisciplinaire sur la robotique de l'école d'ingénierie et des sciences appliquées Harvard John. A. Paulson, Cambridge, Etats-Unis.

¹² Les *Exovest* ou *Exosuits* sont des exosquelettes constitués en grande partie de matériaux souples.

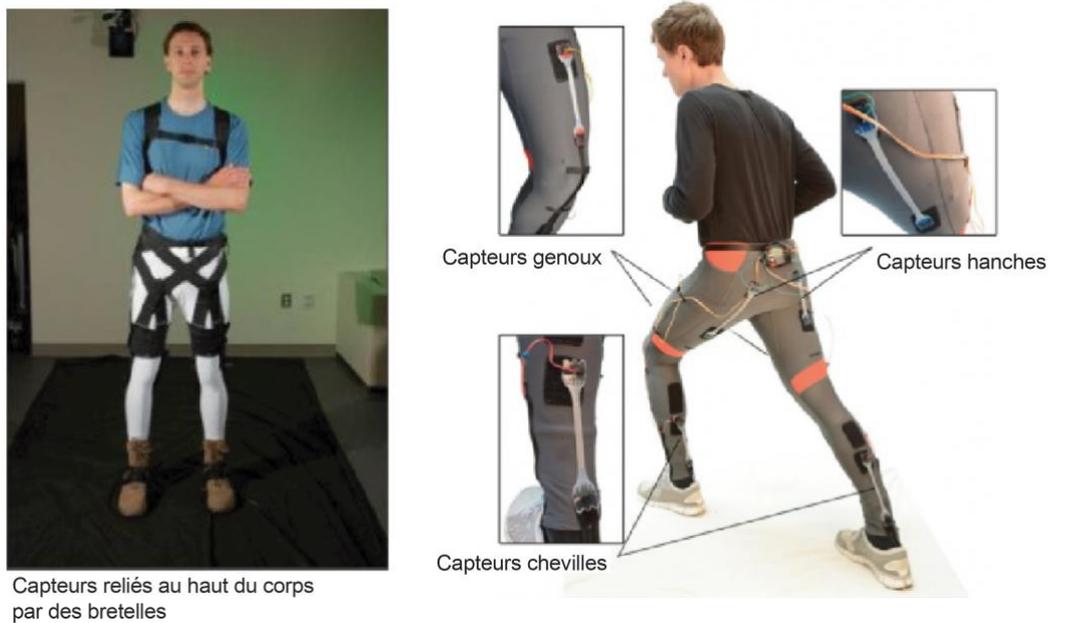


Figure 9. Le *Superflex* (SRI International) fonctionne avec des capteurs souples reliés à des moteurs par des câbles, le long d'un harnais et de bretelles textiles.

Des perspectives semblent prometteuses sur le développement de ces systèmes, mais ils sont généralement moins puissants que les exosquelettes rigides.

2.2.4 En fonction des parties du corps assistées

Dans une classification proposée par l'INRS (2017), les exosquelettes sont des systèmes avec contention et peuvent être des dispositifs d'assistance passifs (DAP) ou des robots d'assistance actifs (RAP). Ils peuvent ensuite se distinguer en fonction des parties du corps ciblées par l'assistance, comme le montre la Figure 10 :

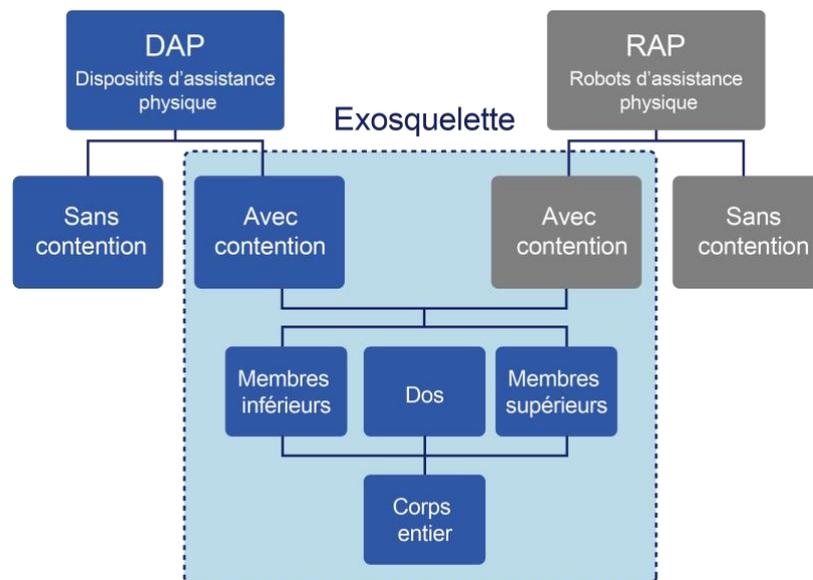


Figure 10. Classification des nouvelles technologies d'assistance physique, d'après un schéma de l'INRS (2017).

Une règle générale observée est qu'un exosquelette est conçu pour une posture spécifique et donc assiste une partie du corps en particulier. De fait, on peut trouver des exosquelettes 'membres supérieurs' (*upper body*) ou 'membres inférieurs' (*lower body*). Quelques exemples de ces exosquelettes sont représentés dans la Figure 11. Cependant, de par la complexité de leur conception et de leur poids, même avec des matériaux souples, les exosquelettes pour le corps entier sont très rares et les chercheurs développent plutôt une logique de parties spécifiques à une partie du corps, modulables et utilisables séparément comme l'exosquelette SHIVA (Ergosanté, s. d.).



Figure 11. Quelques exemples d'exosquelettes conçus pour assister une partie spécifique du corps. Le modèle *Airframe* (Levitate), le modèle *Worker* (Exhauss), le modèle HAL (Cyberdyne) et l'*IronHand* (Bioservo).

Pour la suite du travail de recherche, nous nous focaliserons sur un exosquelette passif dédié aux membres supérieurs pour assister une posture 'bras levés'.

2.3 Présentation de l'exosquelette à l'étude

2.3.1 Fonctionnement général du modèle passif *SkelEx*

En ce qui concerne notre travail de recherche, nous avons expérimenté l'utilisation de l'exosquelette *SkelEx* car il correspondait aux besoins d'assistance de nos partenaires, lors d'opérations d'assemblage ou de préparation de surfaces qui impliquaient une posture bras-levés (Chapitre 3, section 0). De plus, ce système passif offre l'avantage d'un poids réduit (moins de 5 kg), et il est peu encombrant. Au cours des trois dernières années, nous avons pu tester plusieurs prototypes et avons contribué à son développement par des retours utilisateurs et des recommandations en conception. Les travaux présenteront les résultats des expérimentations avec les deux dernières versions du prototype, présentées dans la

Figure 12 (Exo A à gauche et Exo B à droite) avec lesquelles nous avons réalisé les expérimentations présentées dans les chapitres suivants.



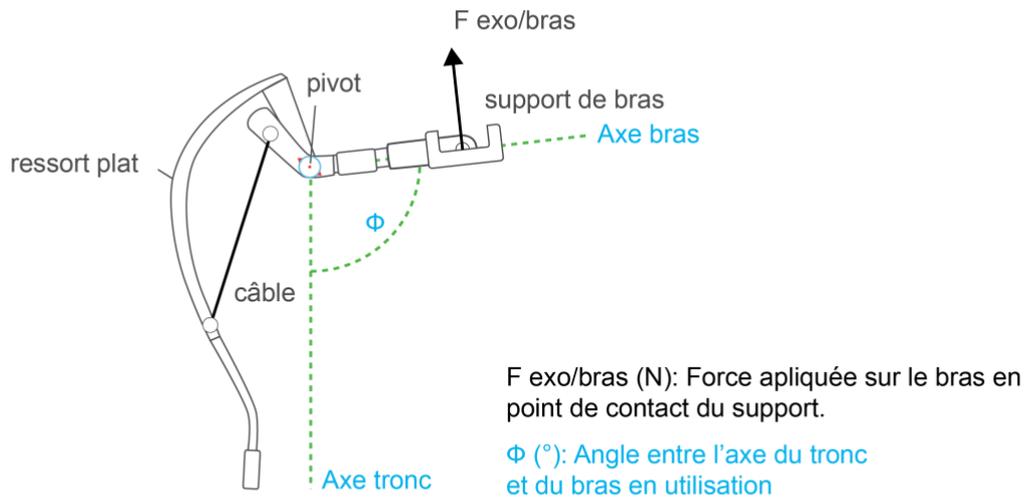
Figure 12. Les deux versions du prototype : Exo A et Exo B.

Comme le montre la Figure 11 l'Exo A (à gauche) et l'Exo B (à droite) sont très semblables. L'Exosquelette B (Exo B), prototypé en début d'année 2019 est plus récent que l'exosquelette A (Exo A), prototypé fin 2018. La société *SkelEx* a cependant intégré dans l'Exo B quelques améliorations provenant des remarques issues des tests terrain. Les modifications entre les différentes versions du prototype se situent principalement au niveau du poids et de l'ajustabilité morphologique. Ces différences sont synthétisées dans la Table 3 à la fin de cette section.

2.3.1.1 Principes mécaniques généraux

Le fonctionnement de l'assistance est caractérisé par l'application de contraintes physiques déterminées par un angle (tronc-bras), une direction (vers le haut) et une intensité progressive. Le principe mécanique est très simple : lorsque le gilet est en place, l'utilisateur 'charge' le ressort plat (ou 'lame ressort') en baissant les bras. Le ressort ainsi chargé exerce un couple sur le bras fixé à l'exosquelette, autour de son point de pivot. Ce qui a pour effet de créer une force progressive de levier sur le bras. La Figure 13 montre la force appliquée par le ressort de manière progressive avec un maximum de $F = 27N$ à environ 85° pour l'angle tronc-bras dans le sens de la rotation du bas vers le haut.

a) Principe général de l'assistance



b) Action progressive du système à ressort plat exercée sur le bras par rapport à l'angle tronc-bras

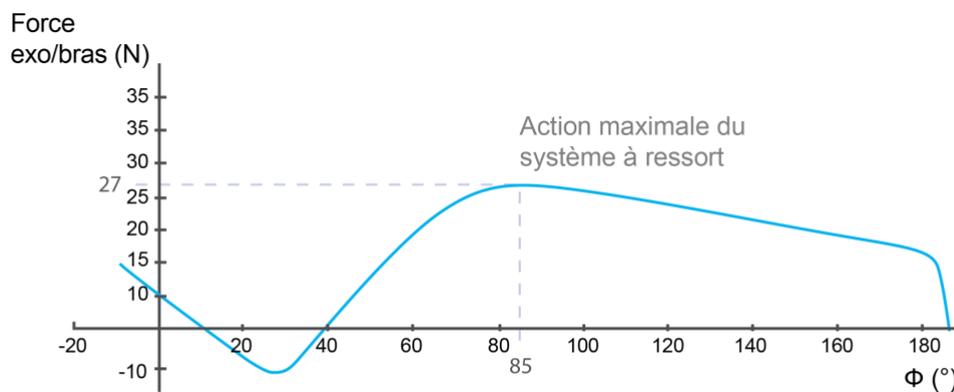


Figure 13. a) Le ressort plat exerce une force maximum de 27 N en rotation autour du pivot, du bas vers le haut. b) Les ressorts plats (lames ressorts) fournissent une force progressive dans l'angle tronc-bras vers le haut, devant soi.

Si nous regardons maintenant en détail les principes mécaniques de l'Exo A et B, nous voyons qu'ils sont très similaires (Figure 14). La différence se situe principalement dans l'architecture de l'assemblage des ressorts. En effet, pour l'Exo B, les ressorts plats ne sont plus fixés dans la ceinture mais sont encastrés dans des cylindres dans lesquels ils peuvent pivoter.

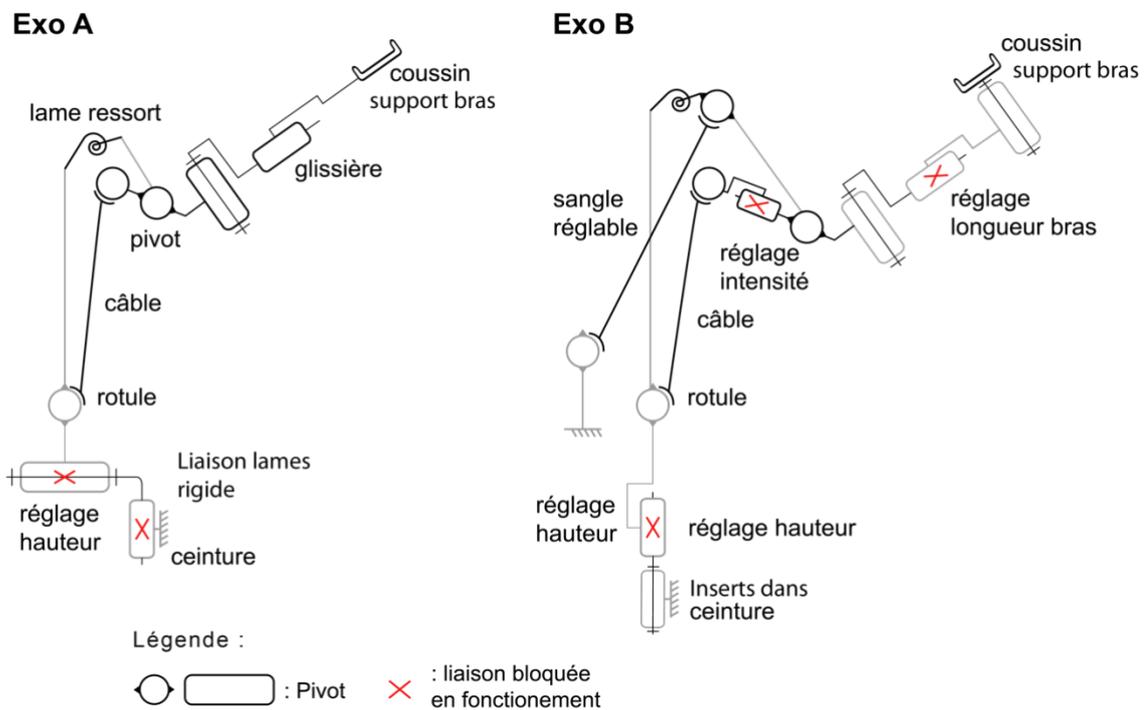


Figure 14. Principes mécaniques généraux de l'Exo A et B composés de ressorts plats (lames ressorts).

L'absence de liaison rigide entre les lames ressorts (ou 'ressorts plats') pour l'Exo B permet de moins contraindre la position des bras et donc d'offrir potentiellement une plus grande liberté de mouvement. De plus, la possibilité de régler la position de la structure de l'épaule de l'Exo B permet de mieux l'aligner avec le bras de l'opérateur et potentiellement offrir un meilleur confort. Le confort perçu sera interrogé dans les expérimentations via un questionnaire, dans une partie 'Aspects physiques' (confort, liberté de mouvement, zones de gêne) ([Annexe 5](#)).

2.3.2 Assistance posturale et limites d'utilisation

Cet exosquelette conçu pour assister les postures 'bras levés' cible donc une réduction de la sollicitation des groupes musculaires impliqués dans cette posture (Kim & Nussbaum, 2019; Theurel et al., 2018) c'est-à-dire principalement les muscles des épaules (deltoïdes), les biceps et triceps, représentés dans la Figure 15.

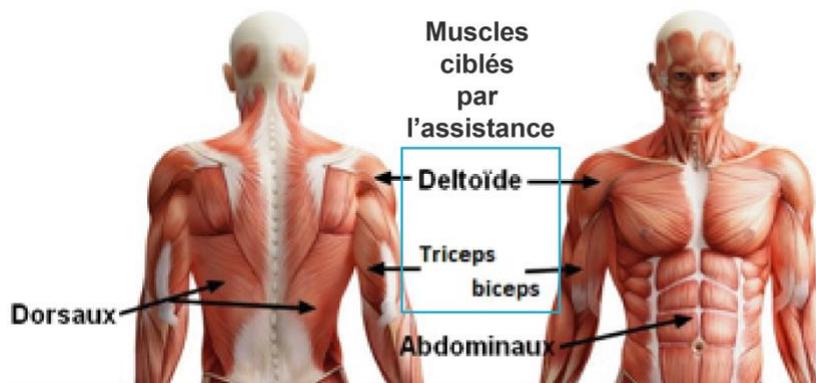


Figure 15. Représentation anatomique des groupes musculaires du haut du corps.

Cependant, l'assistance posturale a des limites : le constructeur indique sur sa brochure que l'assistance n'est pas optimisée lors de certains mouvements et suggère une enveloppe d'utilisation (Figure 15) qui se situe principalement devant soi, sur le plan sagittal. Les mouvements avec les bras trop écartés ou avec les mains au-dessus de la tête sont déconseillés (enveloppe rouge sur la Figure 16).

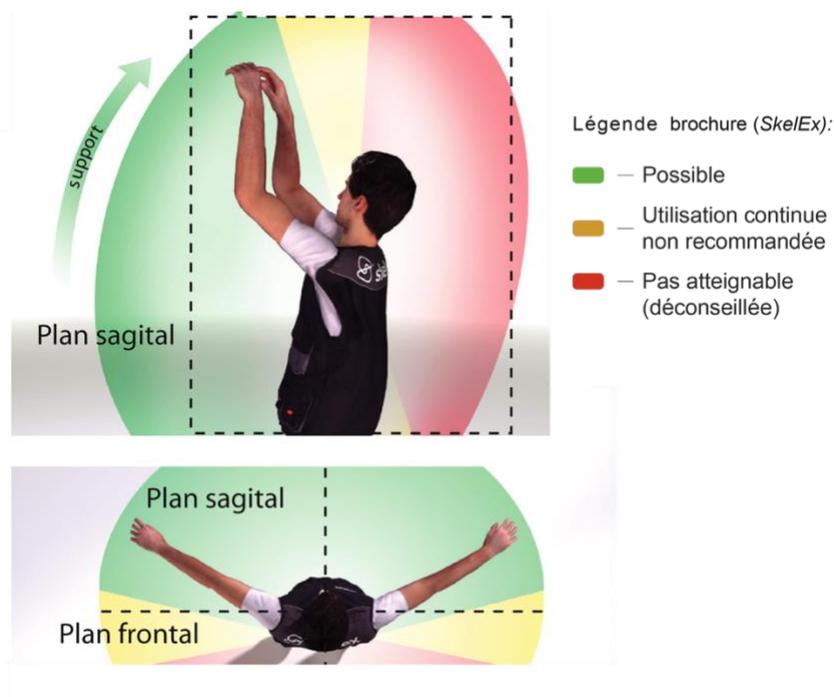


Figure 16. Enveloppe des mouvements 'possibles' (en vert), 'non recommandés' (en jaune) et 'pas atteignables' (en rouge). Modélisation d'après la brochure de SkelEx (SkelEx, Rotterdam, Netherlands).

2.3.3 Interface produit-humain

La Figure 17 présente une illustration des parties rigides et souples des deux prototypes. Le concept général est basé sur une structure et une installation connue : le sac à dos. Le principe d'usage est le même : c'est un gilet composé de parties rigides (lames ressorts, support de bras) et souples (bretelles, ceintures) destiné à soutenir les bras lorsqu'ils sont levés devant soi.

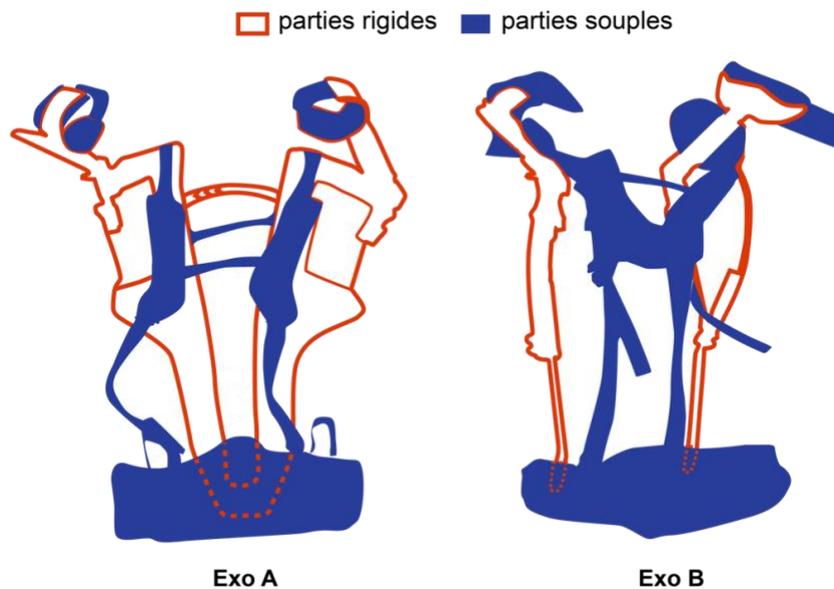


Figure 17. Illustration des parties rigides et souples de l'Exo A (à gauche) et de l'Exo B (à droite).

La surface des parties rigides est réduite pour l'Exo B qui est globalement plus souple, grâce aux lames ressorts pivotantes insérées dans la ceinture. L'Exo A possède des lames fixes qui s'appuient sur le dos pour et rendent l'ensemble plus rigide. Une synthèse des spécifications techniques est présentée dans la Table 3 ci-après.

Table 3. Synthèse des différences principales entre l'Exo A et l'Exo B.

Spécifications	Exo A	Exo B
Poids	3.5 kg	2.4 kg
Structure (parties rigides)	Liaison rigide entre les ressorts plats	300cm ²
Surface (parties souples)	300cm ²	400cm ²
Intensité de l'assistance	Non réglable	Réglable
Nombre de réglages possibles	6	10
Zones de contact corporel	Dos, bretelles, ceinture, bras.	Bretelles, ceinture, bras.

2.4 Participation au cadre normatif Humain-Exosquelette en construction

Le statut réglementaire de l'exosquelette reste en construction. Pour le moment, il n'est ni considéré comme un équipement de protection individuel (EPI) ni comme un dispositif médical. Cependant en 2019 : *Ske/Ex* certifie leur modèle CE et ouvre la voie à d'autres constructeurs Européens.

Normes associées en Ingénierie des facteurs humains

- ISO/IEC 60601-1-6 (2010). Exigences générales pour la sécurité de base et les performances essentielles – Norme collatérale : **Aptitude à l'utilisation**
- ISO/IEC 62366. (2015). **Dispositifs médicaux – Application de l'ingénierie de l'aptitude à l'utilisation aux dispositifs médicaux.**

Depuis 2016, un groupe de travail étudie l'ergonomie de l'interaction Humain-Exosquelette. Ce groupe intégrant des experts, des préventeurs et des partenaires industriels, a rédigé un premier rapport pour guider la rédaction de la future Norme NFX35 en proposant de classifier l'évaluation de l'ergonomie de l'interaction humain-Exosquelette en 3 catégories : critères objectifs (physiologiques, physiques), critères subjectifs (sociologiques, acceptation), critères par modélisation (simulation). Le travail de thèse s'appuie en partie sur les échanges auxquels nous participons lors des réunions du groupe, notamment sur le choix des méthodes d'évaluation et des retours d'expérience industriels.

3 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons expliqué l'intérêt des entreprises pour les exosquelettes et les bénéfices attendus sur la préservation de l'opérateur humain au travail. Une typologie des exosquelettes, une modélisation de l'interaction 'Humain-Exosquelette' dans le contexte industriel et une analyse de l'interface avec le produit ont été proposées. Enfin, l'exosquelette à l'étude a été présenté en détail à travers ses principes mécaniques généraux, et le fonctionnement de l'assistance physique pour la réalisation de tâches 'bras levés'. Nous allons expliquer dans le chapitre suivant les approches méthodologiques impliquées dans le travail de recherche.

Chapitre 2

Approches méthodologiques

Dans ce chapitre, nous proposons une synthèse des éléments méthodologiques utilisés pour l'étude de l'interaction Humain-Exosquelette. Nous commencerons par expliquer les différentes méthodes liées à **l'étude des effets du port de l'exosquelette** qui sollicitent des mesures ergonomiques (physique et de l'activité), et perceptives. Ensuite nous résumerons les approches de la littérature concernant **l'étude de l'acceptation des systèmes innovants** centrée sur **l'utilisabilité** dans le contexte des premières utilisations (familiarisation) d'un exosquelette industriel. Enfin, nous discuterons d'une méthodologie globale d'intégration de l'exosquelette en entreprise, basée sur une **approche centrée utilisateur**, que nous souhaitons proposer dans le but d'accompagner nos partenaires industriels à l'adoption éventuelle de ces systèmes.

1 Étude des effets du port de l'exosquelette

Les effets potentiels de l'exosquelette sont très attendus, notamment sur le soulagement de la pénibilité physique au travail, la réduction des TMS, la réduction de l'effort dans un but de préservation des opérateurs. En 2018, L'INRS publie des 'principes de vigilance' mettant en garde sur le risque d'évolution des contraintes mécaniques appliquées au corps lors de l'utilisation d'un exosquelette (Theurel & Claudon, 2108). Les travaux de recherche se concentrent donc sur l'équilibre entre la performance de réalisation de la tâche et les effets sur le corps (Bosch et al., 2016; Wren, 2018).

L'étude de l'effet des exosquelettes est multicritère et peut faire intervenir des disciplines comme l'ergonomie physique ou la physiologie et l'ergonomie de l'activité. Les principaux champs d'étude de l'interaction Humain-Exosquelette sont :

- L'analyse de l'activité humaine,
- La pénibilité physique (charge physique de travail),
- La sollicitation musculaire,
- La sollicitation cardiovasculaire (coût cardiaque),
- La performance humaine,
- La perception de l'opérateur humain et sa charge mentale.

Cette première partie décrit chacun d'entre eux.

1.1 Analyses ergonomiques préliminaires

1.1.1 Analyse de l'activité humaine

Au préalable de l'intégration de l'exosquelette sur la situation de travail, il est nécessaire de réaliser une analyse préliminaire de l'activité afin de bien comprendre les contraintes existantes. L'analyse de l'activité utilisée en ergonomie du travail (Falzon, 2004) permet de comprendre la relation entre l'opérateur humain, la tâche et son environnement. Elle distingue le travail prescrit (tel qu'il est demandé) et le travail réel (tel qu'il est réalisé), décrit comme l'enchaînement de toutes les actions d'un travailleur au sein d'un système de travail (NF EN 614-1+A1, 2009).

Le champ de l'ergonomie de l'activité présente l'opérateur humain comme un régulateur (Leplat, 2008), qui s'ajuste soit en réaction, soit en anticipant une variation sur son organisation ou de ses outils par exemple (Hubault, 1995). Cette analyse vise donc à comprendre les compromis actuels qui régissent l'opérateur humain et ses contraintes. L'activité humaine étant décrite sous plusieurs dimensions, elle sollicitera des méthodes de

mesures objectives pour déterminer L'exosquelette visant principalement à la réduction de la pénibilité physique, il s'agit tout d'abord d'analyser la charge physique associée.

1.1.2 Analyse de la charge physique

Afin de mesurer la pénibilité physique des opérateurs en amont de l'utilisation d'un exosquelette, l'INRS conseille d'avoir réalisé une analyse de la charge physique et propose un document de référence ainsi qu'une grille d'évaluation des risques de TMS (INRS, 2018). Cette analyse interroge 5 indicateurs : efforts physiques, dimensionnement, caractéristiques temporelles, caractéristiques de l'environnement, organisation. Il existe de nombreuses méthodes d'observation pour caractériser la pénibilité d'une posture dont le Ovako Working Posture Analyzing Posture (OWAS) (Karhu et al., 1977) ou le '*rapid upper limb. Assesment*' (RULA) (McAtamney & Nigel Corlett, 1993) qui sont les plus couramment utilisées dans l'industrie. RULA est une méthode d'enquête écologique (Figure 18) basée sur l'observation par un expérimentateur de la posture d'un opérateur, attribuant des points aux parties du corps en fonction de leurs sollicitations (poids de la charge, angulation, répétitivité...). Elle permet de cibler la posture la plus pénible selon des facteurs de risque quantitatifs. Généralement, l'analyse posturale combine des critères de positions des parties du corps comme l'angulation tronc-bras pour la posture 'bras levés', des critères liés à la tâche (durée et fréquence) et le poids de la charge.

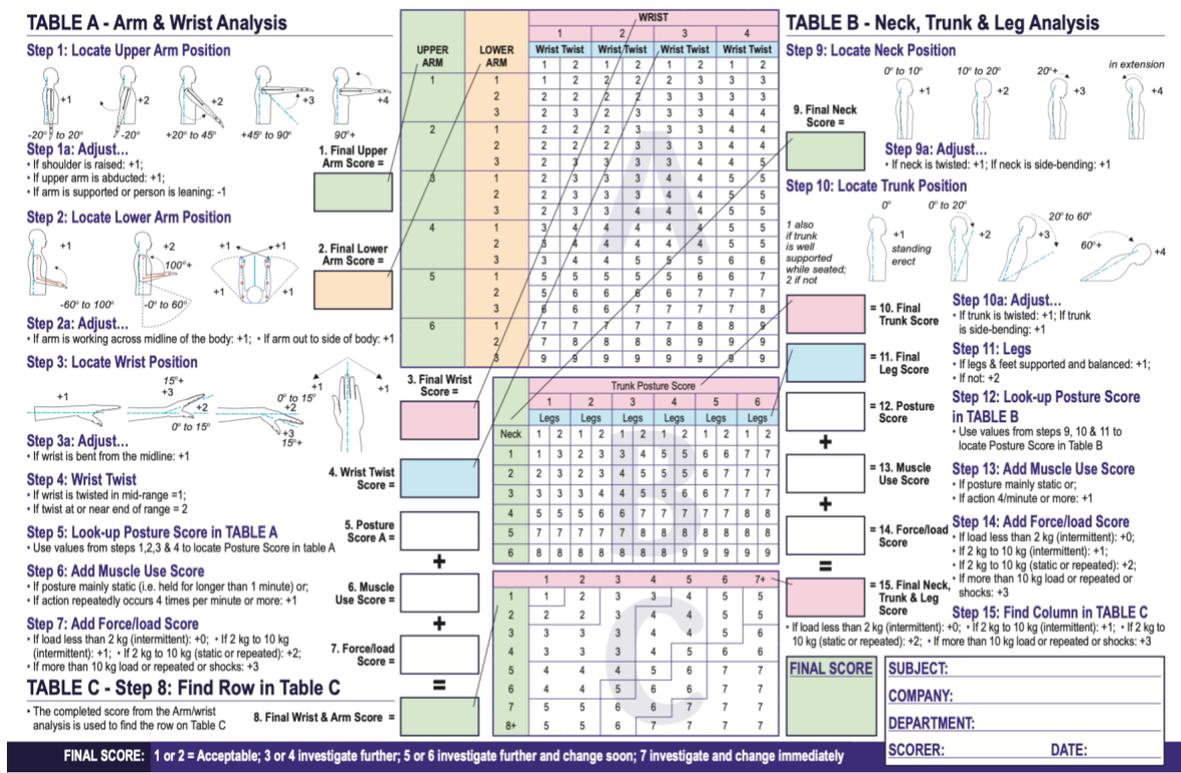


Figure 18. La grille d'analyse RULA permet d'attribuer un score de pénibilité globale de la posture par observation (Morgan Maxwell, 2018).

1.1.3 La sollicitation musculaire : EMG

La méthode la plus commune utilisée pour observer les effets du port de l'exosquelette sur la sollicitation des muscles ciblés par l'assistance des muscles est l'électromyogramme de surface (Bosch et al., 2016; Gopura & Kiguchi, 2009). Ces recherches utilisent l'évolution de l'amplitude du signal électrique généré par les muscles lors de l'effort et compare ce signal à une valeur de référence qui peut être la contraction volontaire maximum du participant (MVC) pendant quelques secondes ou bien la *Reference Voluntary Exertion* (RVE) obtenue par le maintien très court d'une posture sollicitante. Cette valeur de référence est comparée en pourcentage à la valeur du signal moyen lors de l'effort étudié. Le résultat obtenu est un pourcentage comparatif de la moyenne quadratique du signal (RMS) par rapport à la MVC ou la RVE. De nombreuses études utilisant cette méthode rapportent une réduction significative des tensions musculaires de l'épaule sur les muscles fléchisseurs ciblés par l'assistance (Gopura & Kiguchi, 2009). Cependant ces recherches soulèvent également des risques de sollicitations sur d'autres muscles (Graham et al., 2009b; Spada et al., 2017a). Il faudra donc prendre en compte l'évolution de l'effort musculaire localement, sur différentes

parties du corps, qui peut être évaluée subjectivement par les opérateurs (Borg, 1970). La section 1.5 détaillera les mesures perceptives. L'équipement associé à cette méthode de mesure inclut généralement des capteurs placés sur la surface de la peau et un appareil récepteur du signal électrique.

1.1.4 La sollicitation cardiovasculaire : la cardiofréquencemétrie

Historiquement utilisée dans la mesure de l'effort physique de l'activité sportive, cette méthode s'est popularisée en France dans les années 90 via son intégration dans la médecine du travail (Meunier, 1997). Cette méthode utilisant la variation du rythme cardiaque permet de quantifier l'effort global fourni par l'opérateur, c'est un indicateur reconnu de la pénibilité globale souvent associée à d'autres mesures de l'effort local comme l'EMG ou l'effort perçu pour évaluer l'astreinte physique pesante sur le travailleur. Elle est également couplée à l'analyse de l'activité pour identifier objectivement les postures les plus pénibles. L'analyse de la variation du rythme cardiaque permet de calculer l'astreinte cardiaque ou 'coût cardiaque' lié à l'activité. Différents indices moyens ou crêtes peuvent être calculés pour être associés à un niveau de pénibilité. Ils correspondent à la différence entre la fréquence cardiaque au repos (H_r ou H_{relax}) et la fréquence cardiaque moyenne (coût cardiaque absolu moyen : CCA moy) ou maximum pendant la tâche (Coût cardiaque relatif au 99ème percentile : CCR99) obtenu avec la fréquence cardiaque maximum atteinte pendant 1% du temps. Un score peut être attribué aux valeurs obtenues pour classer la pénibilité de 'acceptable', 'plutôt lourde' ou 'excessive' selon des valeurs seuils (Meunier, 2014). Ou bien plus simplement, en multipliant le CCA avec la durée de la tâche (min), cette dernière méthode ne peut s'appliquer que sur une tâche ciblée en amont. La première intervient plutôt pour une analyse globale de la pénibilité sur la journée de travail. L'utilisation de cette méthode offre de nombreux avantages par rapport à nos contraintes de terrain : elle est facile et rapide à installer, très peu intrusive pour les opérateurs, accessible pour les concepteurs et ergonomes de l'équipe bien qu'elle requière quelques connaissances de base notamment sur la pose du matériel et les contre-indications (hypertension, grossesse...). La Figure 19 montre le matériel utilisé pour capter le rythme cardiaque : un émetteur placé sur une ceinture abdominale renvoie les données à une montre, le signal est ensuite transmis à l'ordinateur par infrarouge ou Bluetooth et est préanalysé par un logiciel comme ErgoPulse® ou PolarTeam5®. Le logiciel permet de visualiser une courbe d'évolution de la fréquence cardiaque (battements/minute) en fonction du temps ainsi qu'un histogramme montrant la répartition en pourcentage de temps en fonction de la valeur de fréquence cardiaque. La lecture combinée de la courbe et de

l'histogramme permet d'identifier les indexes de fréquences cardiaques maximum, minimum et moyen, utilisés dans les calculs d'indices du coût cardiaque dont les valeurs sont associés aux catégories de pénibilité.



Figure 19. Système d'enregistrement POLAR® RS800CX de la fréquence cardiaque composé d'une montre connectée à une ceinture abdominale.

Un matériel de mesure mobile comme celui-ci, facile et rapide à installer, est très avantageux pour les études de terrain. Ce dispositif peut être associé à une évaluation, par questionnaire, de la perception sur l'effort perçu localement, sur différentes parties du corps (Theurel et al., 2018).

1.2 Mesure de la performance et erreur humaine

Un effet potentiel attendu par les industries concerne l'influence du port de l'exosquelette sur la capacité de l'humain à réaliser la tâche en respectant certains critères de performance. La question de la performance humaine est délicate à aborder en entreprise dans l'absolu. Le temps de réalisation de la tâche n'est représentatif que s'il peut être projeté sur du long terme tout comme le rythme de l'opérateur. Si l'opérateur passe un peu plus de temps à réaliser la tâche mais réduit le nombre d'erreur et d'arrêts de travail, l'utilisation de l'exosquelette reste intéressante. Il est donc difficile pour le moment d'établir des critères de performance standards incluant l'exosquelette et il paraît plus prudent de proposer des critères spécifiques aux cas d'usage.

La notion de performance est liée à celle de l'erreur humaine, qui peut être décrite par une décision inappropriée, indésirable pouvant réduire la performance et la sécurité du système. (Sanders & McCormick, 1993) mais qui peut aussi provenir de l'impossibilité pour l'opérateur de réguler ses 'conditions internes' et les 'conditions externes' de la nouvelle situation à

laquelle il fait face (Van Elslande, 2000). L'intégration de l'exosquelette représente un changement important et pourrait donc être une source d'erreurs. Une taxonomie de l'erreur humaine est proposée par Reason (Reason, 1990) qui distingue les erreurs inconscientes (basées sur le savoir-faire implicite) et les erreurs conscientes (basées sur les règles et les connaissances). Il est bien sûr difficile de prévoir quels types d'erreurs pourraient arriver et lesquelles mesurer. On se basera sur le moment sur la mesure des erreurs involontaires dont les critères seront définis avec le groupe projet pour évaluer des erreurs spécifiques aux tâches comme un choc dans la coque de bateau impliquant un retour du bateau dans l'atelier (nombre de retour dans l'atelier), un mauvais serrage d'écrou (correspondant à une reprise de l'action par l'opérateur). Ces tâches demandant une certaine dextérité, il faudra reproduire des tâches en laboratoire qui impliquent de réaliser des gestes précis.

1.3 Mesure de la perception de l'utilisateur

Le choix de l'utilisation de l'assistance reste libre pour les opérateurs, il est donc essentiel d'évaluer leur satisfaction. En complément des mesures objectives détaillées précédemment, différentes méthodes de mesures perceptives (subjectives) peuvent permettre d'évaluer les effets du port de l'exosquelette sur les contraintes liées à la réalisation de la tâche. De manière générale, il s'agit d'évaluer si les effets 'attendus' de l'exosquelette sont perçus par l'opérateur. Il s'agit principalement des aspects physiques comme l'évolution de l'effort perçu, l'apport perçu, les aspects spécifiques à la tâche (performance, respect des standards de qualité...), et des aspects cognitifs comme la demande de concentration. Dans ce but, des échelles psychométriques sont couramment utilisées, comme les échelles de type Likert (Sanders & McCormick, 1993; Hill et al., 1992) qui évaluent les critères subjectifs sur une échelle visuelle (de 0 à 7 ou de 0 à 10), l'échelle RPE (*Rating of perceived exertion*) de Borg pour l'effort perçu globalement et l'échelle CR-10 dédiée à l'effort local perçu (Borg, G.A, 1982; Neely et al., 1992). Certaines entreprises utilisent également le questionnaire NASA TLX (Task Load Index) initialement développé dans le domaine de l'aéronautique (Hart & Staveland, 1988) et qui interroge les dimensions de charge physique, mentale, temporelle, la performance ressentie, l'effort impliqué et le niveau de frustration sur une échelle de notation. Ces échelles de notations subjectives permettent notamment de caractériser la pénibilité d'un poste de travail et d'identifier les opérations les plus pénibles. Dans la suite du travail de recherche, nous utiliserons ce type d'échelles de notation subjective pour évaluer la charge physique et cognitive de la tâche

avec et sans l'exosquelette et plus globalement pour évaluer subjectivement l'interaction de l'opérateur avec l'exosquelette.

1.4 Synthèse des méthodes de mesure des effets du port de l'exosquelette

Les méthodes d'analyses pouvant être employées pour étudier les effets du port de l'exosquelette sont nombreuses. Issues de différents domaines de recherche, nous pouvons les classer en différents types de critères d'évaluation, et en fonction des moyens et ressources nécessaires à leur déploiement par rapport à notre capacité organisationnelle. La Table 4 présente les critères d'évaluation principaux et leurs méthodes de mesures ainsi que le type de ressources nécessaires (internes ou externes) à nos équipes projet.

Table 4. Matrice des critères d'évaluation principaux et de leurs moyens et ressources nécessaires.

Critères d'évaluation	Moyens matériels	Type de mesure	Ressources
La mesure de l'activité	Questionnaire Nordique	Subjective	internes
	Journal de bord	Subjective	internes
La charge physique	EMG	Objective	externes
	Echelle de Borg , questionnaire charge de travail	Subjective	internes
La sollicitation musculaire	EMG	Objective	externes
	Echelle de Borg (CR-10)	Subjective	internes
La sollicitation cardiovasculaire	Cardiofréquecemétrie	Objective	internes
	Echelle de Borg (RPE), autoconfrontation, interview	Subjective	internes
La performance humaine	Motion capture	Objective	externes
	Questionnaires (Nasa TLX..)	Subjective	internes
Perception de l'opérateur et charge mentale	Questionnaires	Subjective	internes
	(Nasa TLX..), journal de bord (suivi individuel)	Subjective	internes

Nous nous appuyerons donc sur cette matrice ainsi que sur nos échanges avec le groupe de travail AFNOR qui propose une synthèse des méthodes d'évaluation dans une première version d'un accord cadre AC Z 68-800. Il faut également noter que parce que nous souhaitons étudier les effets du port de l'exosquelette directement sur le terrain, d'autres critères s'ajoutent tels que la mobilité du dispositif, le coût de la mise en œuvre et le temps nécessaire à la mise en place et aux analyses des données. Quelques essais en laboratoire ont été réalisés afin de tester différents types d'instrumentations. Les dispositifs de l'analyse du mouvement (Système de motion capture, ART) et de l'EMG (système Myo Arm band) sont très longs à installer, difficiles à analyser (présence d'artefacts, manque de précision) et peu compatibles avec l'utilisation de l'exosquelette (encombrement des câbles,

chevauchement des capteurs...). Ce genre de dispositifs portés risquant d'entraver les mouvements, ils ne seront pas exploités pour les expérimentations dont le but est l'observation au plus près des conditions de travail.

Bilan sur l'étude des effets du port de l'exosquelette

L'étude des effets du port de l'exosquelette peut impliquer de nombreuses méthodes, car on s'attache à mesurer des facteurs liés à la performance du système technique, à la performance humaine et à la perception de l'opérateur. Si les méthodes objectives sont nombreuses (Sollicitation musculaire, sollicitation cardiovasculaire, mesure de la performance...) elles restent assez difficiles à mettre en place sur le terrain et demandent une grande expertise. Des études récentes préconisent des études plus écologiques (basées sur l'observation de la situation réelle), intégrant mieux l'opérateur humain. En effet, la perception de l'opérateur humain et son acceptation vis-à-vis de l'exosquelette sont peu interrogées ainsi que l'impact potentiel du système Humain-Exosquelette sur son activité. L'étude des effets du port de l'exosquelette doit s'appuyer sur des méthodes de mesures qui allient des critères objectifs et perceptifs. Ces méthodes doivent être simples, facilement mobilisables sur le terrain et facilement duplicables par les chefs de projets de nos partenaires.

Enfin, même si les mesures objectives et perceptives prouvent un effet positif de l'exosquelette, elles ne garantissent pas l'acceptation du dispositif qui dépend d'autres facteurs subjectifs et de l'acceptation du système (Huysamen et al., 2018a; Spada et al., 2017a). Nous allons détailler la notion d'acceptation, les notions associées et leurs méthodes de mesure dans la prochaine section de ce chapitre.

2 Étude de l'acceptation

L'apparition des exosquelettes dans l'industrie a été lente et discrète puisque c'est seulement depuis 2015 (avec les groupes Renault et PSA) que quelques industriels européens commencent à les tester sur les lignes de production. Ils ont ensuite été suivis de sociétés comme BMW (Hetzner, 2016), Ford Motor Company (Krok, 2017), The Boeing Company (Wren, 2018). La lenteur de cette intégration a été notamment expliquée par les limites de conception d'une première génération d'exosquelettes trop lourds, encombrants, inconfortables et inadaptés aux tâches industrielles, qui étaient loin de satisfaire les opérateurs (de Looze et al., 2016; Graham et al., 2009). D'après le modèle de l'innovation de Rogers (Rogers, 1962), les premiers utilisateurs d'une nouvelle technologie sont décrits comme des '*early adopters*'. Dans notre cas, les premiers essais chez nos partenaires industriels nous ont alertés sur un faible taux d'adoption pour la réalisation de tâches industrielles et nous ont interrogés sur leur maturité technologique, mais surtout sur notre capacité à comprendre les facteurs déterminants de leur acceptation envers les futurs utilisateurs. Rien n'indique que les opérateurs aient une propension à utiliser l'exosquelette malgré ses avantages théoriques. Par exemple : le confort, la facilité d'utilisation ainsi que l'image renvoyée par le port de l'exosquelette (pour éviter le surnom de 'Robocop') sont des éléments à considérer.

2.1 Acceptabilité, acceptation et utilisabilité

L'acceptabilité est la propension d'un utilisateur à accepter un système technique. L'acceptation est reliée à l'utilisation et à la manière dont les utilisateurs perçoivent le dispositif. Selon Nielsen, l'acceptabilité se compose de l'acceptabilité pratique, centrée sur l'ergonomie et la conception des systèmes et de l'acceptabilité sociale (Nielsen, 1993) surtout développée en psychologie sociale, qui inclut les contraintes normatives et les comportements pouvant influencer le choix de l'utilisation d'une technologie. L'acceptabilité pratique (ou opératoire) inclut les dimensions de l'usage et donc l'utilité et l'utilisabilité (Figure 20).

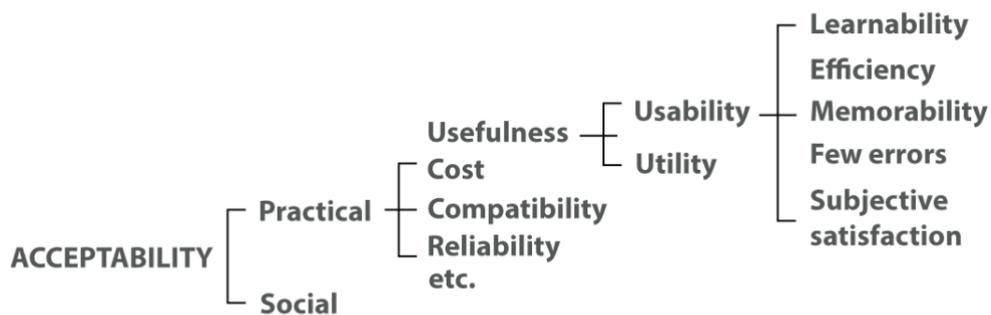


Figure 20. Le modèle de l'acceptabilité, Nielsen (1993)

Certaines distinctions ont récemment été proposées entre acceptabilité et acceptation. L'étude de l'acceptabilité serait basée sur l'étude de l'utilisation d'un système a priori (étude prédictive) alors que l'acceptation serait plutôt reliée au vécu de l'utilisateur et à sa perception lors de l'utilisation d'un dispositif technique (Bobillier Chaumon, 2016). Une étude plus écologique de l'acceptation est encouragée et nous concerne directement : l'usage de l'exosquelette étant nouveau, cela nous oblige à investiguer en situation réelle. C'est pourquoi nous proposerons de construire notre réflexion à partir de l'acceptation pratique (ou opératoire) qui concerne l'étude de l'utilisation. Nous emploierons par la suite le terme acceptation. Au cœur de l'acceptation pratique, Nielsen introduit la notion de *Usefulness*, qui est définie comme la capacité du système à être utilisé dans un but précis, qui peut être séparée par les deux catégories Utilité et Utilisabilité (Grudin, 1992) où l'utilité est la capacité fonctionnelle du système et l'utilisabilité renvoie à la facilité d'utilisation des fonctions et concerne tous les aspects de l'interaction avec le système, dont les protocoles d'installation, de familiarisation et de maintenance.

2.3.1 Les critères d'évaluation de l'Utilisabilité

L'utilisabilité est définie par la norme ISO 9241-11 comme le « degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ». Les critères de l'utilisabilité sont définis par Nielsen (Nielsen, 1993) comme ceci:

- *Learnability* (facilité d'apprentissage) : l'apprentissage du système doit être facile, rapide.
- *Efficiency* (efficience) : le produit permet à ses utilisateurs d'atteindre le résultat prévu, l'objectif est atteint avec le moindre effort ou requiert un temps minimal.

- *Memorability* (facilité de mémorisation) : l'utilisation du système doit être facile à mémoriser.
- *Errors* (erreurs) : l'utilisation du système ne doit pas conduire à des erreurs. Un nombre minimum d'erreur doit être visé.
- *Satisfaction* (satisfaction) : le système doit être plaisant à utiliser (évaluation subjective de l'utilisateur). La description de la norme ISO a ajouté la notion de 'confort de l'interaction' pour l'utilisateur.

Chacun de ces attributs est utilisé pour décrire un système d'information à usage numérique mais pourrait s'adapter au contexte de l'utilisation de l'exosquelette en tant que système Humain-Exosquelette. L'utilisabilité est une notion proche de celle d'affordance, Cette notion utilisée dans différents domaines de recherche, a été introduite par la psychologie (Gibson, 1979) puis par la psychologie cognitive (D.A. Norman, 1988) en sciences de la conception. Cette notion est aujourd'hui plus largement utilisée dans la conception de systèmes complexes (Maier & Fadel, 2006) qui mettent en valeur l'importance de confronter des prototypes ou artefacts aux futurs utilisateurs. Cette approche propose de prendre en compte les capacités humaines, leurs variabilités et leurs évolutions possibles en interaction avec un produit, avant de le concevoir. Enfin, une étude récente propose de travailler sur une relation plus 'naturelle' avec le système technique qui ne doit pas être considéré comme un objet 'en dehors' de l'humain (Brangier et al., 2010). Sur ce principe, d'autres auteurs (Benders et al., 1995; Griffith, 2006) utilisent la notion de symbiose ou du 'vivre avec' qui implique que l'humain et la technologie s'influencent de manière réciproque. Ce dernier point de vue correspond bien à l'utilisation de technologies d'assistance comme les exosquelettes qui doivent 'épouser' le corps de l'opérateur et ne pas constituer de gêne par un interfaçage optimisé. Ces dernières recherches appuient le besoin de ne pas chercher à anticiper les facteurs sur les modèles existants, mais à les étudier de manière écologique au plus près de l'usage, dans des environnements réalistes (Spada et al., 2017a). Sur ce principe, nous proposerons dans le chapitre 4 une méthode en plusieurs étapes pour identifier les facteurs d'acceptation sur les tâches de finitions de coques de bateau et nous appuierons en partie notre analyse sur l'adaptation de ces facteurs à notre contexte.

La partie suivante décrit les méthodes d'évaluation adaptées aux facteurs d'acceptation précédemment cités.

2.3.2 Les méthodes d'évaluation associées

Dans le domaine de l'Interaction Humain-Machine (IHM), de nombreux auteurs se sont intéressés à l'utilisabilité et aux contraintes créées par les interfaces (Bastien & Scapin, 1997; Mayhew, 1992). On peut trouver différentes normes et principes ergonomiques issues de l'ergonomie de l'interaction. Parmi ces nombreuses méthodes, nous pouvons citer des méthodes d'investigation issues notamment de la 'recherche-action' (Argyris & Schön, 1991) largement employées dans la mesure de l'utilisabilité comme l'observation, les interviews, les focus groups (discussion en groupe), l'autoconfrontation, les tests utilisateurs. L'utilisabilité étant subjective, des échelles psychométriques sont généralement employées pour évaluer la perception de l'utilisateur vis-à-vis d'un système. Par exemple, le SUS (System Usability Scale) (Brooke, 1996) propose une série de questions pour analyser le contexte de l'utilisation. Cette échelle est peu employée dans le contexte des exosquelettes qui privilégie des échelles de type Likert (Hansen et al., 2018) permettant de quantifier des variables spécifiques à la réalisation de la tâche avec l'exosquelette. Le confort physique (de Vries et al., 2019; Kim & Nussbaum, 2019; Van Engelhoven et al., 2019) est souvent interrogé sur une échelle type Likert (Cummins & Gullone, 2000). Ces recherches préconisent une investigation plus écologique, c'est à dire basée sur l'utilisation réelle (Kim et al., 2018 ; Spada et al., 2017) en intégrant si possible les futurs utilisateurs. Récemment, des facteurs d'acceptation potentiels ont été identifiés dans le secteur agricole par questionnaires et concernent notamment l'accessibilité (coût), la durabilité, l'ajustabilité du système à différentes situations de travail (Upasani et al., 2019). Dans le secteur de la construction, Kim et al. (2019) ont identifié que l'entraînement à l'utilisation et l'utilisabilité étaient les leviers principaux pour favoriser la volonté d'utiliser l'exosquelette. Enfin, le poids de ces facteurs subjectifs par rapport à la performance objective de l'opérateur reste flou. Hensel et Keil (2019) mettent en évidence que l'acceptation (influencée par l'utilisabilité perçue et le manque de confort) n'est pas fortement lié à la réduction du confort et les bénéfices perçus ne sont évidents que sur une tâche spécifique, ce qui met en évidence des limites fonctionnelles (conception spécifique à une tâche ou une posture) qu'il est nécessaire de prendre en compte dans l'évaluation. Enfin, il est important de noter que la plupart de ces recherches impliquent une population assez petite et homogène de jeunes hommes inexpérimentés, en laboratoire.

2.2 Familiarisation et notions liées

Une des constatations lors des premiers tests et interviews avec les opérateurs en 2017-2018 (Moyon et al., 2018) est le décalage entre leur imaginaire et les capacités réelles de l'exosquelette proposé qui plus est à l'état de prototype. La théorie de disconfirmation des attentes (Oliver, 1980) explique l'importance de comprendre ce décalage entre un idéal projeté comme le concept de 'l'humain augmenté' et les capacités réelles d'une solution. Oliver suggère que le premier usage d'une technologie détermine si celle-ci sera utilisée ou non. Cet effet est confirmé par une étude récente où l'expérience de l'utilisateur influence sa volonté d'utilisation future (Martin et al., 2016). La phase de familiarisation est donc essentielle dans le processus d'acceptation.

2.2.1 Familiarisation et appropriation par l'opérateur humain

La facilitation de l'utilisation de ces systèmes devient de plus en plus importante avec la croissance des technologies notamment numériques, créant de nouvelles interfaces (Coutaz, 1990) qui se doivent intuitives. Les recherches sur la coopération Humain-Machine mettent en évidence un processus d'appropriation de la part de l'utilisateur qui doit être pris en compte dans l'intégration d'une technologie d'assistance. D'après Goodrich et Schultz la conception des interactions Humain-Machine passe notamment par l'adaptation, l'apprentissage et la formation des hommes et des machines (Goodrich & Schultz, 2007). Ainsi, les travaux récents dans le domaine de l'interaction Humain-Machine montrent un intérêt croissant pour la mobilisation de critères liés à l'apprentissage, la formation, et la familiarisation des futurs utilisateurs. Dans le domaine de l'interaction Humain-Machine, l'appropriation est décrite comme un phénomène temporel et une valeur stratégique de la technologie (De Vaujany, 2006). Pour (Erickson, T. 1996), l'appropriation humaine de l'objet technique implique une prise en compte de 'l'intelligence technique' et d'un socle de connaissance commun entre les parties prenantes du projet. Il serait donc important pour les futurs utilisateurs d'exosquelette d'en comprendre d'abord le fonctionnement. Pour Dourish (Dourish, 2003), l'appropriation se situe entre la connaissance de l'objet technique et la pratique. Cette approche est partagée par Carroll (Carroll, 2004) qui caractérise le processus d'appropriation (*appropriation cycle*) par une étape intermédiaire entre la technologie telle qu'elle a été conçue et la technologie 'en usage', pleinement utilisée et adoptée. Les utilisateurs doivent pouvoir se familiariser à la technologie et explorer les possibilités qu'offre celle-ci, en ayant une documentation adaptée. Une mauvaise connaissance de l'objet technique pouvant amener à un rejet (*non-adoption*). Cette vision de

l' appropriation par l'usage est partagée en ergonomie du travail par une approche récente dite 'constructiviste (Daniellou & Béguin, 2004) proposant d'intégrer des 'utilisateurs pionniers' en amont de la conception pour favoriser l'analyse des modifications éventuelles d'un système et favoriser l'adoption de la future solution. Il est donc important de considérer ce temps préliminaire à l'adoption, et de l'accompagner avec une expérience et une documentation adaptée. D'autant plus que dans notre contexte, il s'agit d'accompagner la familiarisation des futurs utilisateurs à un système innovant (qui ne ressemble à aucune technologie connue) au stade de prototype. Le risque de rejet est donc peut-être encore plus grand. En connaissance de ces mécanismes, notre futur protocole d'intégration devra proposer un accompagnement par l'usage documenté, sécuritaire et permettre aux futurs utilisateurs d'explorer les possibilités et limites de l'exosquelette pour éviter les risques de rejet.

2.2.2 Évaluation de la maturité

La plupart des projets industriels s'appuient sur une échelle de maturité de la technologie ou *Technical Readiness Levels* (TRL) développée à l'origine par la Nasa (Mankins, 1995; Sadin et al., 1989) puis intégrée dans la norme ISO 16290 (2013) et ainsi étendue à tout système technique. Cette échelle mesure la maturité de la technologie sans interaction avec l'humain. Dans le domaine de la robotique, on trouve le TRL associé à l'IRL (*Integration Readiness Levels*) (Long, 2011) qui étudie la maturité de la technologie à travers son architecture. Pour ajouter l'aspect humain à ces méthodes centrées sur la technologie, certaines approches issues d'autres domaines voient le jour, préconisant l'intégration de l'humain et de formation adaptée. C'est le cas du HSIP (*Human System Integration Process*) développé par la défense américaine qui préconise certaines recommandations centrées sur l'humain comme l'entraînement (Whitmore et al., 2008) ou le HRL (*Human Readiness Levels*) développé par l'industrie de l'armement (Phillips, 2010) qui sous-entend qu'il faut préparer l'humain à la technologie de manière extérieure à l'utilisation. De toutes les propositions de mesure de l'interaction Humain-Machine, aucune ne détaille la familiarisation nécessaire pour accompagner l'apprentissage de l'opérateur humain à l'utilisation. Or, nous avons besoin d'identifier un niveau de familiarisation minimum pour pouvoir réaliser nos tests en toute sécurité et surtout pour décider si l'opérateur est capable d'utiliser une technologie sans supervision. Pour répondre à ces objectifs, nous avons proposé une échelle de mesure de la maturité de l'interaction Humain-Exosquelette pour identifier et accompagner la progression de la familiarisation des futurs utilisateurs à

l'exosquelette (HEFL). Pour cela, nous nous sommes appuyés sur des échelles de maturité existantes (type TRL) et notre expertise à la formation des opérateurs en associant les connaissances théoriques (principes généraux, fonctions, principes de sécurité...) et la pratique (réglages, expérience d'utilisation) de l'exosquelette qui nous semblaient importantes à différents niveaux, de 0 (aucune connaissance ni expérience) à 7 (connaissance et pratique maîtrisée). La Figure 21 présente une première formalisation de cette échelle et souligne le niveau 4. En résumé, nous considérons que les connaissances et la pratique associées à ce niveau sont celles que nous devons considérer comme minimum pour pouvoir utiliser l'exosquelette sans supervision et conditionne la validation de la formation. Le contrôle de ce niveau de familiarisation se fait par le formateur qui vérifie que toutes les conditions soient validées pour délivrer l'habilitation à l'utilisation. Par exemple, l'opérateur doit savoir installer l'exosquelette rapidement pour répondre aux contraintes de temps.

HEFL Niveaux de familiarisation Humain-Exosquelette		Description
0	Aucune expérience antérieure. C'est un système inconnu	Plus bas niveau d'expérience. L'opérateur n'a aucune connaissance du dispositif ni d'expérience antérieure. Sa perception peut être biaisée par 'l'effet science fiction' (film, publicité...)
1	Connaissance de base (fonctionnement). Premier contact visuel	L'opérateur a une connaissance basique du dispositif mais aucune expérience d'utilisation. Sa perception peut être biaisée par 'l'effet science fiction' (film, publicité...)
2	Connaissance des principes techniques et des applications du dispositif.	L'opérateur a une connaissance basique des principes généraux et techniques. Les applications et limites du dispositifs ont été expliqués. Un test d'installation à été réalisé.
3	Connaissance approfondie du dispositif. l'installation/ajustements/désinstallation est maîtrisé.	L'opérateur a une connaissance approfondie de l'exosquelette, incluant les principes de sécurité et les recommandations d'utilisation. Il sait l'installer en moins d' 1min 30, avec vérifications des points de sécurité.
4	Connaissance des risques et limites. Validation subjective de l'exosquelette sur les tâches simulées (hors poste).	L'opérateur a acquis toutes les connaissances des niveaux précédents. Il a expérimenté les limites de l'exosquelette avec le protocole de test (gestes simples et gestes techniques).
5	Validation subjective de l'exosquelette avec un test sur le poste.	L'opérateur a acquis toutes les connaissances des niveaux précédents. Il a utilisé l'exosquelette pendant au moins 48h (conseillé : 2h /jour). Il a positivement validé le dispositif (Score acceptation > 7/10).
6	Validation subjective de l'exosquelette sur le poste après un test long. Pratique expérimentée sur le poste.	L'opérateur a acquis toutes les connaissances des niveaux précédents. Il a utilisé l'exosquelette régulièrement pendant 1 semaine (conseillé : 2h /jour). (Score acceptation > 7/10).
7	Adoption de l'exosquelette. Il est utilisé fréquemment et est évalué après plusieurs tests longs sur le poste.	L'opérateur a acquis toutes les connaissances des niveaux précédents. Il a utilisé l'exosquelette pendant au 3 semaines (conseillé : 4h /jour max). (Score acceptation > 7/10). Les impacts sur l'organisation/process/habitudes ont été adoptés.

Figure 21. Échelle de mesure du niveau de familiarisation Humain-Exosquelette. Un utilisateur certifié doit avoir un niveau minimum de 4.

Bilan sur l'étude de l'acceptation de la technologie exosquelette

La performance objective liée à l'utilisation de l'exosquelette n'est pas suffisante pour garantir l'acceptation du dispositif dans l'entreprise. De plus, il est impossible de prédire l'acceptation ou le rejet d'une nouvelle technologie pour laquelle il n'y a pas d'usage correspondant, qui ne ressemble à aucune autre. La littérature récente sur l'acceptation propose d'étudier des facteurs déterminants en usage réel. Ces études soulignent le besoin d'études plus holistiques et écologiques afin de mieux comprendre les facteurs déterminants de l'acceptation pouvant être dépendants d'une tâche spécifique. Issus du contexte des sciences informatiques et de l'interaction Humain-Machine, ces facteurs doivent être adaptés au contexte de l'exosquelette industriel. Nous proposons donc une investigation écologique et participative des facteurs de l'acceptation incluant l'utilisabilité de l'exosquelette.

La familiarisation est une phase importante qui pourrait influencer l'acceptation de l'exosquelette. Une échelle de niveaux de familiarisation Humain-Exosquelette (HEFL) est proposée et sera expérimentée dans le but de standardiser un niveau minimum de connaissances et de pratique avec l'exosquelette afin de mieux personnaliser les formations et de pouvoir certifier les futurs utilisateurs à une utilisation sécuritaire et performante.

Nous avons noté que les expérimentations sont généralement réalisées sur une population jeune, de non-experts à la tâche réalisée, plutôt masculine.

3 Contribution aux méthodes de l'entreprise pour l'intégration d'un exosquelette

3.1 Le métier d'Intégrateur : émergence des méthodes

Le métier d'intégrateur de solutions d'assistance est en construction et le cadrage méthodologique de l'intégration d'un exosquelette étant absent de la littérature, nous nous sommes appuyés sur les premiers retours d'expérience des industriels¹³ pointant notamment : le mauvais ciblage des tâches ciblées par l'assistance, le manque de formation des utilisateurs, le manque de flexibilité des exosquelettes à une très grande diversité d'applications. Globalement, ces retours soulignent un manque de prise en compte de l'activité de l'humain, sa perception, sa familiarisation à l'exosquelette et les modifications éventuelles de la situation de travail. Les méthodes employées pour l'intégration de l'exosquelette restent aujourd'hui très empiriques. Parfois, il est fait référence à des concepts organisationnels comme le 5S (Pettersen Jostein, 2009). Conçue à l'origine pour l'organisation des ateliers de production (Ohno, 1988), elle est souvent utilisée pour des problèmes d'optimisation des situations de travail (Wilson, 2010). Si cette démarche qualité permet d'appliquer des principes et des recommandations, elle n'est pas suffisante. En effet, s'agissant d'une phase de familiarisation, les modifications éventuelles des gestes techniques de l'opérateur ou de son processus par exemple, ne sont pas connues. Or c'est un aspect important sur nos cas d'usage qui demandent une dextérité manuelle importante et des hauts standards de qualité. Il est donc nécessaire de réfléchir à la situation de travail potentiellement modifiée avec l'exosquelette (évolution de l'effort ressenti localement sur d'autres muscles, accessibilité aux outils par exemple). Pour ces raisons, certains partenaires confient la fonction d'intégration de l'exosquelette à leur service R&D qui est alors chargé d'anticiper les modifications de la nouvelle situation de travail. Ils s'appuient généralement sur leur méthode de conception interne comme la méthode Symop (syndicat des entreprises et technologies de production). Cette méthode s'inscrit dans un objectif de robotisation des précédés industriels et se déroule en quatre étapes avant-projet, projet, formation, bilan (Symop, 2011). Cette méthode est linéaire (non itérative), non participative et ne prend pas en compte l'interaction Humain-Machine pour l'utilisation d'un exosquelette. Nous allons aborder quelques éléments méthodologiques qui prennent en compte les facteurs humains en conception.

¹³ Échanges avec les partenaires industriels (2016-2020) et sur la plateforme participative AFNOR pour la future norme NF35XA.

3.2 L'opérateur dans la conception industrielle

Cette partie traite des approches permettant d'intégrer les facteurs humains en conception (*Human Factors Engineering*). Les approches centrées sur l'humain dans la conception de systèmes sont issues de différents domaines de recherche (Service de la technologie et de la stratégie France, 1997). Nous nous concentrerons uniquement sur ceux en lien avec la conception industrielle (HCD, *Human Centered Design* ou *UCD, user-centered design*) qui incluent la conception et l'ergonomie de l'interaction humain-machine. Cette analyse nous permettra d'introduire les notions importantes pour la proposition d'un protocole d'intégration de l'exosquelette centré sur l'humain.

3.3.1 La conception centrée utilisateur (CCU)

La conception centrée sur l'utilisateur ou conception orientée utilisateur est une démarche de conception issue de l'ergonomie logicielle (Boy, 2011; Norman, 1988) puis étendue à la conception et l'ergonomie de l'interaction Humain-Système (Bastien & Scapin, 2004) où les utilisateurs finaux interviennent tout au long du processus. Cette démarche participative connaît un regain du fait de la nécessité d'une conception centrée sur les utilisateurs, actuels ou potentiels, qui devient évidente dans tous les secteurs de conception de biens et de services (Darses & Reuzeau, 2004). Elle repose sur le développement d'une solution guidée par les besoins des utilisateurs. D'après la norme ISO 9241-210, mise à jour en 2019, les critères d'application et de mise en œuvre de la démarche de conception centrée utilisateur dans l'industrie sont :

- La prise en compte en amont des opérateurs humains, de leurs tâches et de leur environnement (approche systémique ou holistique),
- La participation active des utilisateurs, garantissant la fidélité des besoins et des exigences liées à leurs tâches,
- La répartition appropriée des fonctions entre les opérateurs humains et la technologie,
- L'itération des solutions de conception, jusqu'à satisfaction des besoins et des exigences exprimés par les utilisateurs,
- L'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire.

Cette norme décrit le déroulement de cette méthode comme une boucle itérative comprenant en général quatre étapes principales, représentée dans la Figure 22. La première étape d'un processus de CCU débute avec **la compréhension et la spécification**

du contexte d'usage (1) où l'équipe pluridisciplinaire doit être constituée, les enjeux expliqués et les barrières à la satisfaction utilisateur et au développement de la solution identifiées. Toutes les actions nécessaires à la compréhension du contexte sont réalisées (prise en compte des normes internes, règles, analyse préliminaire de l'activité...). La population cible est caractérisée (âge, caractéristiques physiques...). Un groupe d'utilisateurs potentiels est identifié et un appel à volontaire est effectué. Les exigences des utilisateurs finaux, nommés aussi 'opérateurs humains' sont formalisées grâce à différents outils de recueils (observation, interviews, questionnaires) lors d'une deuxième étape de **spécification des exigences utilisateur** (2). Il s'agit d'analyser le besoin des futurs utilisateurs de manière détaillée. Pour le contexte industriel, les tâches sont décrites en détail avec les opérateurs et sont observées (travail réel). Les écarts entre le travail prescrit (tel qu'il est demandé) et le travail réel (tel qu'il est effectué) peuvent révéler des contraintes importantes et montrer les adaptations humaines établies. Pour cela, on peut utiliser différents outils dont l'autoconfrontation ou *Cognitive walkthrough* qui permet d'écouter l'opérateur décrire les contraintes liées à la réalisation de la tâche. Le choix des techniques se fait en fonction du temps, des ressources humaines et techniques disponibles et des compétences de l'expérimentateur. Sur la base des éléments recueillis, les exigences utilisateurs peuvent s'associer à des standards de conception pour **conceptualiser** (3) une première version d'une solution (produit, service, méthode...) qui évoluera en fonction des retours de la phase suivante. En effet, la phase suivante consiste à **tester et évaluer** (4) ce prototype ou *artefact* selon des critères définis par l'équipe du projet en concertation avec les utilisateurs. Elle vise à mesurer l'utilisabilité, autrement la capacité à valider les critères de satisfaction et d'acceptation dans la réalisation des tâches. Dans cette dernière phase, des mesures quantitatives et qualitatives sont engagées afin de définir les besoins spécifiques au contexte.

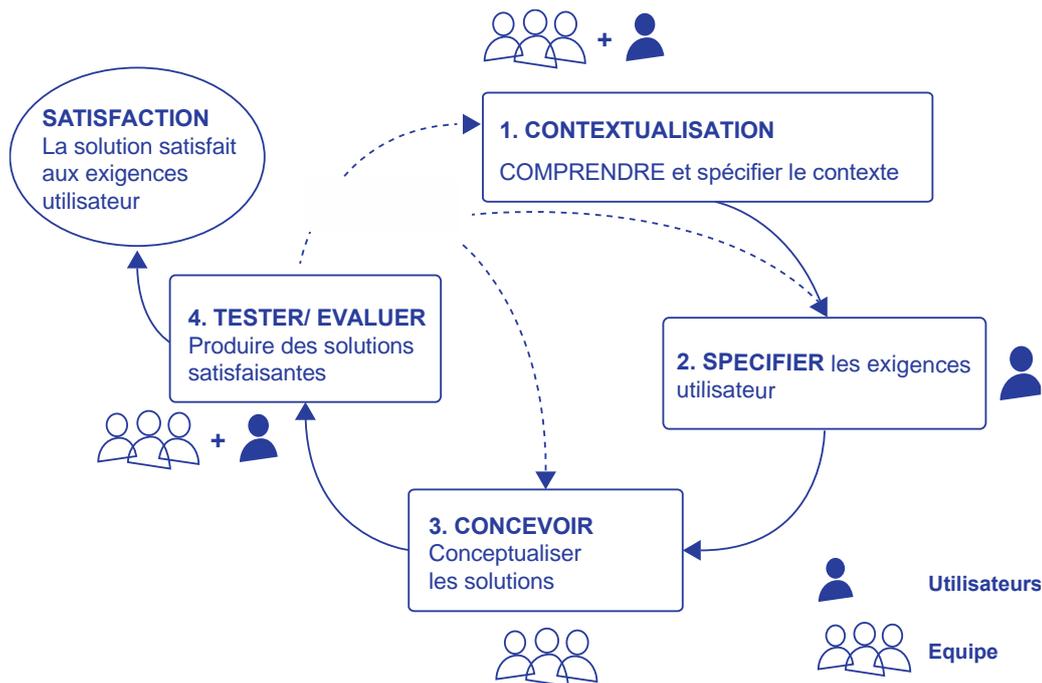


Figure 22. Cycle itératif de la conception centrée utilisateur.

Les intérêts de l'application d'une conception centrée utilisateur sont décrits dans cette norme. Ils incluent l'augmentation de l'efficacité et de la productivité, la facilitation de la compréhension et de l'utilisation, et donc de la familiarisation, l'amélioration de l'utilisabilité et l'accessibilité, la réduction du stress et de l'inconfort visant la santé et le bien-être, le renforcement de l'expérience des utilisateurs. Pour nous, il s'agit d'utiliser cette approche pour la conception du projet d'intégration, qui peut être défini comme une série d'actions visant à favoriser l'achat, mais surtout l'usage de l'exosquelette industriel. Ainsi, intégrer une technologie dans une situation de travail, c'est-à-dire identifier le besoin, conseiller sur la meilleure solution, former les opérateurs, proposer un accompagnement personnalisé des partenaires jusqu'à l'adoption des solutions est un protocole qui nécessite d'engager une équipe pluridisciplinaire, de comprendre et spécifier les critères de satisfaction et d'acceptation et de tester/évaluer l'exosquelette et le protocole lui-même pour éventuellement adapter la situation de travail, un support de formation, le rythme d'apprentissage.

3.3.2 Quelques exemples d'implication des opérateurs

Les **approches participatives en conception** de systèmes et dispositifs de travail (Darses & Reuzeau, 2004 ; Bourassa, 2007; Goyette & Hébert-Lessard, 2014) sont basées sur des méthodes variées qui indiquent différents **niveaux d'implication** de l'opérateur.

Différentes méthodes sont alors sollicitées comme les tests utilisateurs, qui peuvent se faire en groupe (focus group), le tri de cartes (pour identifier des critères de choix par exemple), le journal de bord (questionnaire de suivi individuel). L'autoconfrontation peut être utilisée pour obtenir l'interprétation de l'opérateur de ses propres actions, vérifier une hypothèse observée, valider/critiquer une analyse. Dans notre travail de recherche et en fonction des contraintes humaines, environnementales et organisationnelles, nous avons notamment utilisé les méthodes suivantes :

- Autoconfrontation par 'scénario commenté' : la tâche décrite à l'oral par l'opérateur permet d'imaginer les futures contraintes du système humain-exosquelette. Cette phase peut se suivre d'une autoconfrontation lors de laquelle l'expérimentateur cherche à valider des hypothèses issues de l'observation. Par exemple : 'La raison d'un changement de main est-elle due à la pénibilité physique ou au processus ?'
- Expérimentation/Simulation en laboratoire : une situation de référence est simulée en laboratoire. Ces tests en environnement contrôlé permettent d'isoler certains facteurs, de mesurer des données objectives et perceptives sans ralentir l'activité de l'entreprise et d'élargir le panel de sujets,
- Focus groups : ces échanges sont régulièrement organisés pour valider/ reformuler les critères d'acceptation identifiés lors des tests utilisateurs,
- Journal de bord : permet le suivi individuel de l'utilisation de l'exosquelette et participe à la mesure de l'acceptation.

3.3 Formalisation d'un protocole itératif et participatif

Nous avons donc considéré que l'intégration d'un exosquelette devait être une démarche itérative et participative, visant à adapter au mieux l'exosquelette à la situation de travail avec éventuellement plusieurs tests et évaluations, en tenant compte des besoins des diverses parties prenantes (ergonomes, chef atelier...). Elle peut être représentée par trois étapes principales (Figure 23), qui caractérisent trois 'états' différents de la situation de travail. Les situations initiales et adaptées sont itératives : elles peuvent se répéter si besoin, jusqu'à l'acceptation finale (ou adoption) de la solution.

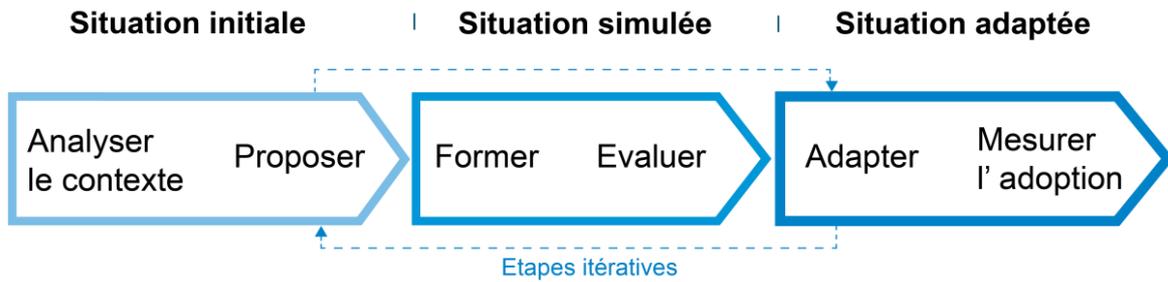


Figure 23. Diagramme représentant le protocole d'intégration de l'exosquelette qui est centrée autour d'une étape de simulation de la situation de travail. Les flèches en pointillé représentent le caractère itératif des étapes.

Les trois étapes principales sont : l'étude de la situation initiale (besoin client, validation du système d'assistance approprié), la situation simulée (tests utilisateurs), la situation modifiée (reconception, suivi). Le passage entre deux étapes est itératif afin de rendre compte des évolutions potentielles de la situation de travail. Des tests sont réalisés au plus près des contraintes réelles, par simulation de l'assistance ou directement situation réelle si cela est possible. Ce protocole d'intégration doit être accompagné de mesures comprenant des facteurs perceptifs et liés à l'acceptation. Il doit aussi proposer une formation adaptée pour favoriser la familiarisation à l'exosquelette. Concernant la familiarisation, les résultats des expérimentations que nous allons présenter dans les chapitres suivants permettront de valider un support développé en interne (tutoriel 'expert') basé sur les niveaux de familiarisation (échelle HFEL). Les effets de ces supports seront étudiés afin de valider son utilité et l'intérêt d'une telle échelle. D'après les résultats, les composantes du protocole d'intégration seront détaillées plus tard dans le chapitre 6, à travers des exemples concrets et des outils-repères pour les intégrateurs et concepteurs.

4 Conclusion

Au regard de la littérature, il existe de nombreuses méthodes d'évaluation concernant les effets potentiels de l'exosquelette, principalement sur des aspects physiques et cognitifs impliquant notamment une analyse de la charge de travail physique et de la perception de l'utilisateur par des échelles psychométriques. Cependant, aucune recherche sur les effets du port de l'exosquelette passif *SkeiEx* n'a été réalisée et les études sur des applications industrielles réelles sont rares. Les travaux sur d'autres modèles d'exosquelettes ne renseignent pas sur l'importance des critères objectifs par rapport à la perception et à l'acceptation de l'opérateur. En parallèle, de nombreux travaux proposent de mesurer la

capacité à utiliser un système (utilisabilité) comme élément central de l'acceptation et invitent à une démarche plus écologique pour identifier les facteurs déterminants de l'acceptation du système. Transversalement, aucune étude ne renseigne à notre connaissance sur les étapes, les méthodes qui permettraient de prendre en compte les facteurs humains dans l'intégration des exosquelettes, et minimiser le risque de mauvaises utilisations, important dans le cas d'une technologie inconnue des utilisateurs. Il est donc nécessaire d'étudier par une approche expérimentale les facteurs d'acceptation et d'expérimenter collectivement des méthodes de mesures. En nous basant sur les approches méthodologiques centrées sur l'opérateur humain, nous proposons une démarche qui devra permettre d'identifier les méthodes de mesures simples, accessibles et facilement reproductibles par l'équipe projet (ergonome, infirmière, chef d'atelier...) pour évaluer les effets du port de l'exosquelette et les facteurs d'acceptation, ainsi que d'accompagner la familiarisation à travers un protocole et des supports adaptés.

Chapitre 3

Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette (article CIRP)

L'exosquelette, également appelé Dispositif d'Assistance Physique (DAP), ne permet pas de modifier la posture physio-pathogène mais seulement de diminuer la sollicitation physique due à cette posture, l'enjeu est donc de pouvoir d'abord évaluer la sollicitation physique liée au port de l'exosquelette dans la même posture. Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude préliminaire visant à valider l'effet positif du port de l'exosquelette et à justifier la continuité du travail de recherche. Pour cela, nous allons tout d'abord évaluer la situation de travail sans exosquelette (situation initiale) puis expliquer l'hypothèse attendue. Enfin, nous allons expérimenter une méthode de mesure objective simple, utilisant l'étude de la sollicitation (astreinte) cardiaque : la cardiofréquencemétrie. Cet indicateur de la pénibilité physique globale nous renseignera sur la quantification des effets liés à l'utilisation de l'exosquelette sur une tâche industrielle. Cette pré-étude sera introduite par un article présenté à la conférence CIRP 2018.

1 Cas d'usage n°1 : tâches de finition sur coques de bateau

Les tâches ciblées par cette première phase de tests sont des opérations de finitions sur coques de bateau : ponçage, polissage, peinture. Ces trois opérations sont réalisées à l'avant, à l'arrière et sous la coque du bateau.

1.1 Analyse ergonomique de la situation initiale

Afin de mieux comprendre les futures interactions humain-exosquelette sur l'activité, nous proposons une approche participative de l'analyse ergonomique. Dans ce but, un groupe projet est formé avec différents services (chef projet, chefs d'ateliers, membres CHSCT, responsable sécurité, ergonome, infirmière).

Le choix des méthodes de mesure est orienté par l'ergonome en interne ainsi que par les propositions du groupe de travail AFNOR. Après avoir discuté du travail prescrit décrit dans des fiches de poste, quatre sessions d'observation ont été menées sur le terrain pour observer le travail réel, incluant le temps détaillé des opérations, les critères de performance et de qualité, le ressenti des opérateurs sur les tâches les plus pénibles. L'analyse de la charge physique de travail dont l'analyse des risques de TMS sont réalisées à partir des outils internes et appuyées sur le guide de l'INRS (2016) et sont supervisées par l'ergonome. L'analyse révèle un risque de TMS pour le haut du corps (Épaules, bras, dos). Une analyse posturale est réalisée avec la méthode d'observation RULA (chap.2 section 1.1.2). Un score de 7 confirme le besoin d'une intervention pour améliorer la situation de travail. Suite à cette analyse, nous proposons de tester un exosquelette dédié à l'assistance du haut du corps lors de la réalisation des tâches bras levés.

1.2 Hypothèse d'un effet négatif sur la pénibilité globale

L'objectif de cette première étape est de prouver un effet positif du port de l'exosquelette sur la pénibilité globale. Or, on peut considérer le port de l'exosquelette comme un ajout de plusieurs contraintes à considérer. Tout d'abord, le poids du dispositif peut potentiellement ajouter une contrainte physique. Ensuite, le système mécanique de soutien des bras n'étant pas réglable, l'utilisateur va devoir éventuellement forcer un peu vers le bas pour réaliser les opérations qui nécessitent de baisser les bras. Cela soulève donc une question fondamentale de l'impact physique de l'exosquelette qui, certes positif sur certains mouvements, pourrait entraîner une augmentation de la sollicitation physique globale et le déplacement de la sollicitation musculaire, à son tour traumatisante. Dans le cadre de la

thèse, il est primordial de répondre à ces questions, un effet négatif de l'exosquelette en phase de pré-étude pouvant signifier un arrêt du projet d'intégration dans l'entreprise.

Nous considérons pour l'étude suivante l'hypothèse d'un effet négatif du port de l'exosquelette sur la charge physique globale lors de la réalisation de la tâche. L'article présente une pré-étude de l'analyse de la pénibilité physique globale du port de l'exosquelette (Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F. *Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations*, CIRP Design Conference (CIRP 2018). Nantes, France. *Procedia CIRP*, 70, 284-289). Après avoir présenté l'étude, nous concluons par une discussion des résultats.

Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations

Aurélie Moyon^{a,b}, Emilie Poirson^a, Jean-François Petiot^a

^aEcole Centrale de Nantes, LS2N (UMR CNRS 6004), 1 rue de la Noë, 44321 NANTES
Cedex 3, France

^bGéBé2 Productique.ZA de l'Espérance. 85600 Saint Hilaire de Loulay.

Abstract

Every year, companies spend millions of euros for Work related musculoskeletal disorders (WMSDs). In order to reduce this cost and pain at work, they started to integrate Physical Assistance Device (PAD) such as exoskeletons. These new products aim to provide physical assistance to the operator but their integration is facing many barriers such as morphological adaptability, bad usability and a negative perception among workers. Exoskeletons are bringing a new type of interaction with human that is crucial to understand. This paper addresses the emerging issue of the impact of PAD on the hardness of manufacturing working tasks and on the usability satisfaction of workers. The use case focuses on a sanding operation on a catamaran hull, with an upper body passive exoskeleton provided by our partner *SkelEx*. Experimental measurements such as cardiac cost, posture analysis and usability tests are carried out on a set of participants during

finishing tasks. In order to better understand how exoskeletons support able-bodied people at work and reduce fatigue, we present results that show a positive impact of the assistance on physical workload.

Keywords: Ergonomics; Design method; Strain; Exoskeleton; Physical Assistive Device (PAD)

1.2.1 Introduction

The development of assistance devices in the industry is nowadays noticeable with many projects on assisting operator's workload with robots, cobots or wearable assistance such as exoskeletons or PAD (Physical Assistance Device). A PAD is an external structure wearable by an operator to reduce strain during working tasks (Delaval et al., 2017). It can be 'active' if it is motorized, or 'passive' (de Looze et al., 2016), and it is used in various applications such as logistic or various manufacturing processes to reduce biomechanical strain. In this direction, PAD slowly appear as a complementary tool to reduce work hardness. On the other hand, most of them are still at a prototype state, facing physical and psychological barriers such as morphological adaptability, usability for various tasks, personal and social acceptance. In this paper, we propose to evaluate the physical workload of finishing tasks on a boat's hull in order to evaluate the relevance for placing a physical assistance system. We choose cardiac cost analysis developed by Meunier because it's a good indicator of the hardness of a working task, which bridges heart rates and physical strain (Boudet et al., 2014). The case study was set up with BJ Technologies that identified the finishing tasks as a heavy workload according to operators feedback and the amount of sick leaves due to musculoskeletal disorders. These tasks include physiopathogenic postures with arms above shoulders. Previously to integrate an exoskeleton in an industrial line, we had to prove the need for a physical assistance. There were different options, from subjective methods questionnaires (Hill et al., 1992) such as a simple form for operators to more objective methods. We propose to observe physical workload with a method using heart rate monitoring. This method allows the identification of variations in cardiovascular efforts during working operations, in order to characterize the effort related to the task and to evaluate the physical impact of a Physical Assistance Device. We based our method on previous research works that linked heart beat measurements as an indicator for physical effort (Meunier, 2014). A formula that estimates a Theoretical Maximum Cardiac Frequency (TMCF) (Gellish et al., 2007) is used to estimate where the human body can push his effort.

On the other side, INBAR [6] recommended that the cardiac frequency should never exceed $(205,8 - 0,685 \times \text{age})$ which determined our upper reference for analysis. From these methods we needed to figure out if the tasks observed are generating a high level of strain that would diagnostic the need for a physical assistance and to characterize the positive impact of it. The purpose of the present study was to firstly examine the extreme and average cardiac frequencies on working phases and establish related cardiac cost values. That allows us to formalize a next experiment in order to compare measurements with and without physical assistance and help us to hierarchize users demands. The remainder of the paper is organized as follows. Section 2 presents the material and method and the description of the experiment. Results are presented in Section 3. The concluding Section 4 provides implications for research and design practice and perspectives for further research.

1.2.2 *Material and methods*

1.2.2.1 *Activity*

We observed finishing tasks on a catamaran Lagoon that include the following phases: sanding with 3 or 4 different papers, coating, polishing, painting. These tasks are repeated on faces and along a sealing edge produced by the assembling of the boat parts. We supposed that the tasks were done with the same surface orientation. We supposed that that the tasks were done with requested quality standards.

1.2.2.2 *Environment of the tests*

BJ Technologies, a worldwide leader in boat manufacturing, allowed us to conduct our experimentations in the finishing workshop of his famous catamaran Lagoon. Roofs and hulls are done separately. We focused our observations on a dedicated hulls workstation in the first place. Figure 24 show catamaran sides (a) while the hatched zone indicates the manual sanding areas (b).

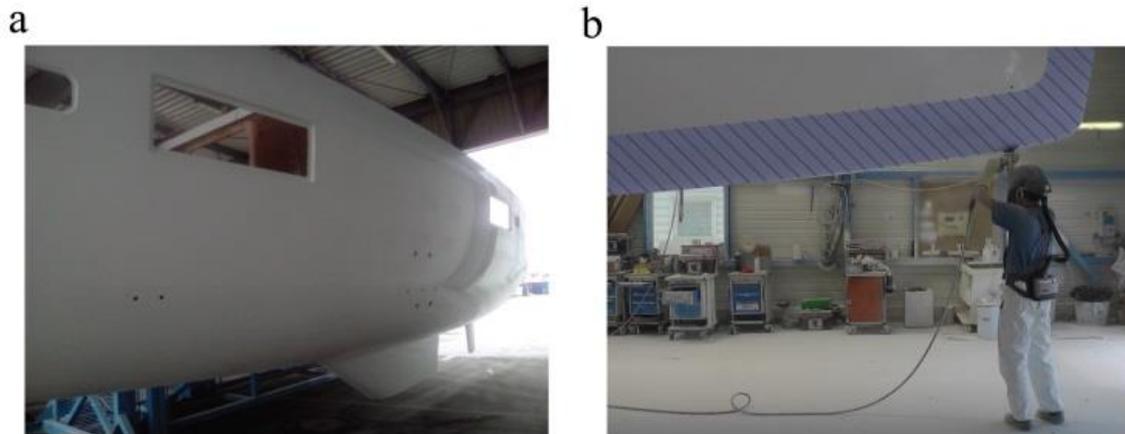


Figure 24. (a) Side view of the catamaran hull; (b) An operator is sanding the sealing edge. Hatches show work zones for manual sanding.

Experiments took place between March and October 2017 on the site of *BJ Technologies*, Dompierre city. Finishing tasks include iterative phases of sanding and polishing, then gun painting. This experimentation field offers postures that could be assisted by a PAD. The manufacturer *Skel-Ex* who provides us the PAD is quite collaborative to share our user-centered approach and really consider our feedbacks to improve their product. Indeed, this study will also help to understand the physical impact of the product and might improve its design by first user's feedbacks. This paper reports on a physical workload analysis of working tasks using cardiac cost soliciting deleterious postures and a first usability evaluation.

1.2.2.3 Participants

9 operators (4 women) participated in the study. Their age span from 20 to 46 years old, with a minimum of 3 months experience according to the cardiac cost protocol from Meunier (Meunier, 2014). All participants were randomly selected among the daily crew working on the same operations. They were asked to follow their usual working process without any change. Some of the participants already felt injuries related to their work. Their physical state of health has been recorded with Nordic questionnaire (Kuorinka et al., 1987) from the last 12 months, the previous week and the day of the test. It helped us to complete the physical workload analysis and later follow up health evolutions. As one operator was under tension medication, we removed her measurements from the results according to cardiac cost protocol.

1.2.2.4 Equipment

The heart rate was measured in real time during the tasks. We used a heart rate computer POLAR RS800CX (Polar, Kimpele, Finland) and its dedicated professional software POLAR Trainer 5. This system is composed of an emitter attachable on a thoracic belt. The data transfer was realized from the emitter to the software by an infrared USB adapter.

1.2.2.5 Cardiac cost protocol

Preliminary study of workload from operators' experience: before the experiments, we recorded previous perceived exertion (perception of physical workload) related to their tasks in order to identify occupational context. Operators were asked to describe all the tasks and targeted their physical strain (shoulders, back...) and tell when the task is the most difficult. Indirect estimations of Heart Rates (HR) can be gained using ratings of perceived exertion (RPE) (Eston & Williams, 1988). This process gave us objective global effect of strain levels for and help us to identify the most demanding tasks. Afterwards, they were asked to rate a level of strain for these identified tasks on a Borg scale (Borg, G.A, 1982). Three experiments were carried out:

Cardiac cost: three complementary objectives.

Experiment 1: To correlate cardiac cost to perceived exertion

Experiment 2: To study cardiac cost on targeted tasks

Experiment 3: To compare cardiac cost with/without PAD

- Experiment 1: two operators (o1, o2), equipped by the heart rate computer, were observed and measured during two long working periods separated by a break.
- Experiment 2: four operators (o3, o4, o5, o6) were observed and measured on two higher strain periods, separated by a break.
- Experiment 3: two operators (o7, o8) were observed and measured with and without PAD in targeted posture with the heart rate computer during two periods separated by a break.

Global satisfaction assessments: We concluded the experiment set by a task usability test that gave us a first user feedback of DAP features using a Likert scale questionnaire

based on acceptability and usability factors (Nielsen, 1993) such as easiness to use, easiness of learning/memorizing, global satisfaction.

1.2.3 Results and Discussion

1.2.3.1 Previous perceived exertion

Prior to measurements, 9/9 operators reported on a questionnaire that the operations under the boat as the most demanding phase. In order to validate this subjective perception, we represent the evolution of cardiac cost in a first long period of work. Then we will be able to target shorter periods to easily repeat experiments. We also used a Borg scale to rank perceived exertion after cardiac cost measurements. We will comment Borg scale ranking after related results.

1.2.3.2 Experiment 1: identifying the most demanding tasks.

Two operators (o1, o2) were observed and measured with the heart rate computer during two periods separated by a break. For operator o1 (Figure 25), the evolution of the heart rate in the first period shows a phase of high heart rates corresponding to sanding catamaran extremities (between 00:30minutes and 00:45 minutes). After a 17 minutes break, we observed a second major high heart rate (inside the black frame) that corresponds to the tasks under the boat along the sealing edge. The most demanding phase is revealed by the highest heart rates above a maximum theoretical heart rate (MTHR) of 180 heart rate per minute (hpm) for this operator, determined as follow: $220\text{hpm} - \text{âge}$ (Tanaka et al., 2001) or $205,8 - (0,685 \times \text{âge})$, (Inbar et al., 1994) with a peak at 215 hpm. These extreme rates correspond to the phase qualified as the most demanding on the previous evaluation of effort questionnaire.

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

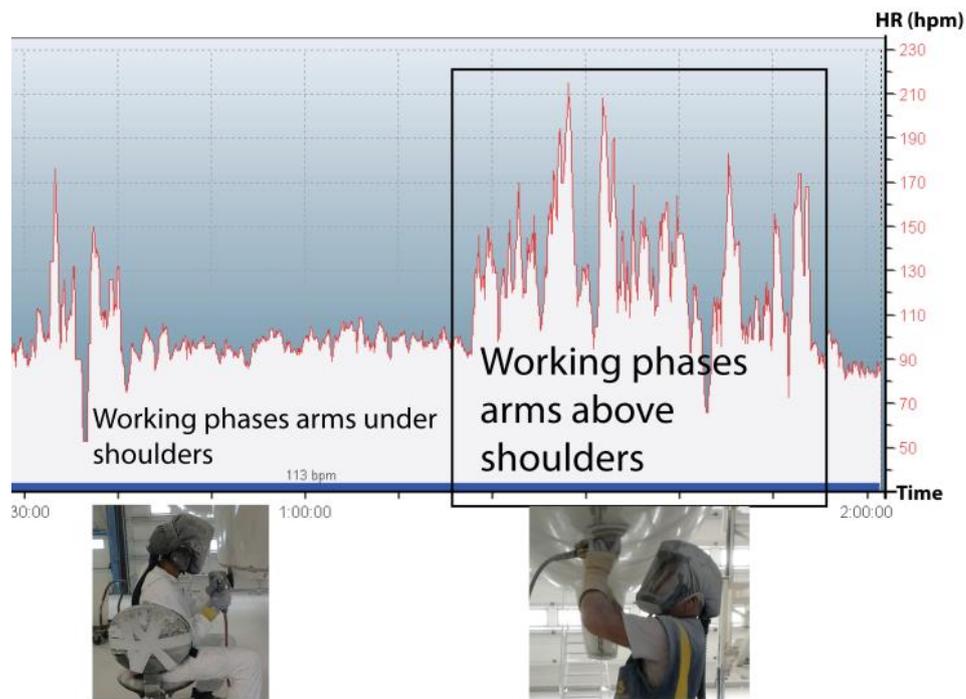


Figure 25. Evolution of the heart rate for operator 1 during usual sanding process. The red curve indicates the evolution of heart rate. The frame on the right focuses on the second measure after a break of 17 minutes. This curve will allow to identify extreme heart beats and average data in the different levels of effort.

For the second operator (o2), a first phase of 30 minutes and a second phase of 45 minutes after a break of 10 minutes also reveals extreme heart rates during sanding tasks under the boat. The Figure 26 shows the evolution of the heart rate during usual tasks. During the first period, we observed a high rate phase that corresponds to a part where he is sanding catamaran extremities. After the break, we observe three major phases of high heart rates. For operator 2, his heart rates exceed his MTHR of 178, with a peak at 196 during the second period measured at 0:25:00. Also, we observed that the moment where heart rates reach several times limit values (**HRmax**) corresponds to the tasks under the boat along the sealing edge. These results validate operators' hypothesis described in the questionnaires: the strain is higher for sanding tasks along the sealing edge on extremities and specially under the boat.

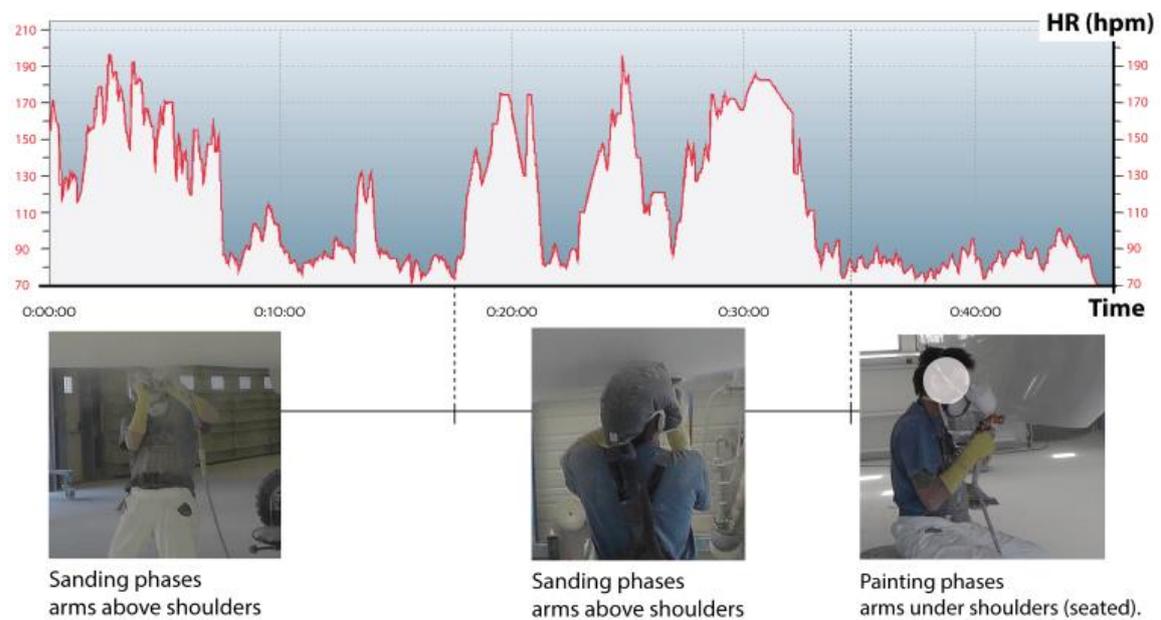


Figure 26. Evolution of heart rate for operator o2 during usual sanding process under the boat.

1.2.3.3 Experiment 2: characterizing physical workload levels by cardiac cost on targeted tasks.

Thanks to experiment 1 that helped us to target the most demanding phases, we were able to focus the next measurements on the corresponding tasks. To conduct physical workload analysis with heart rate data, we compared results obtained to limit values of indexes [9]. Figure 27 shows two types of model provided by the software to analyse heart rates for the operator o5. The first part (a) shows a histogram of the operators' heart rates in percentage of time for the test period. The part below (b) show the heart rate curves during the experiment time. Firstly, we calculated extreme reference values such as their maximum theoretical heart rate (MTHR) and the HR99 (Heart rate of the 99th percentile: 99% of the heart rate measured are below this value). Then we identified on the histogram the percentages of time the results were above these values. For example, the histogram for operator 5 indicates a HR99 of 152 and a percentage of 5,15% corresponding to 6:37 minutes, where his heart rate exceeds maximum heart rate limit value (145hpm for 5 minutes according The World Health Organization). HRmax is found by looking at the higher result on the curve. We also recorded reference heart rate (HRr) before the experiment which is the HR value obtained after a rest of 10 minutes. Secondly, we used average indexes values such as relative cardiac cost for the 99th percentile (RCC99),

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

average heart rate (HR av.), average absolute cardiac cost (ACC av.) and average relative cardiac cost (RCC av.). These averages will be used to define a cardiac profile.

RCC99: relative cardiac cost for the 99th percentile. Cardiac cost value reached only for 1% of working time.

$$RCC99 = \frac{HR99 - HRr}{(MTHR - HRr)} \quad (1)$$

ACC.: absolute cardiac cost. It's the difference between average HR and reference HR (HRr). Where ACC is the difference between Hr max and Hr.

$$ACC = HRav. - HRr \quad (2)$$

RCCav: average relative cardiac cost. It's the ratio between ACC and the difference between MTHR and HRr.

$$RCCav. = \frac{HRav. - HRr}{(MTHR - HRr)} \quad (3)$$

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

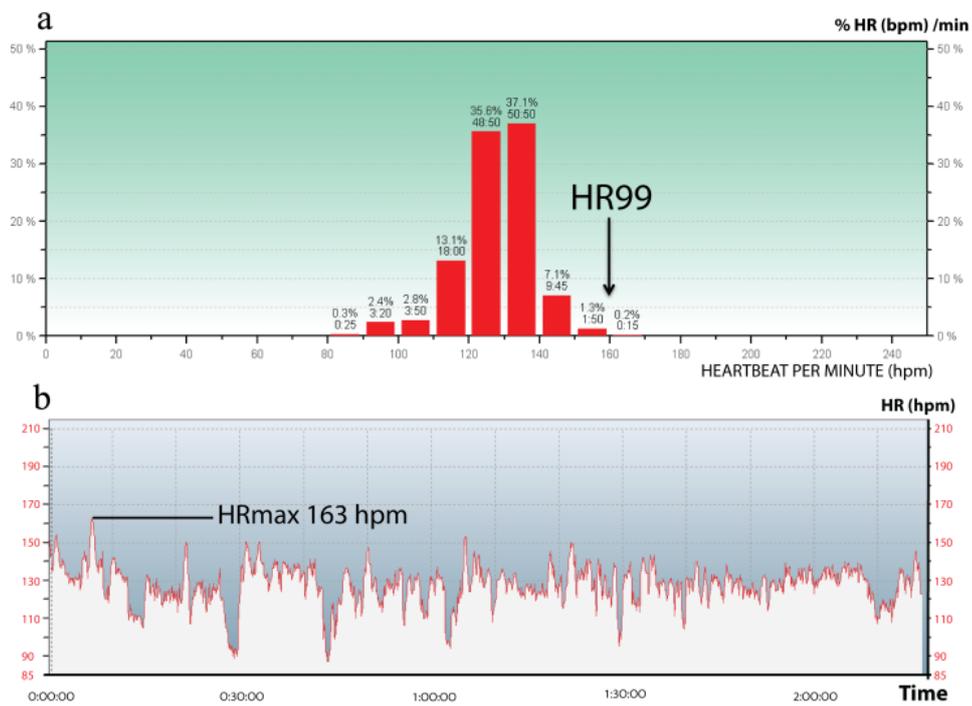


Figure 27. (a) Example for operator 5: histogram related to the curve, showing heart rate averages during sanding task under the boat; (b) Example for operator 5: evolution of heart rate during the related task.

The Table 5 shows the results of extreme indexes and averages for the four participants mentioned. (INRS: The French National Research and Safety Institute, WHO = The World Health Organization).

Table 5. Results of the study of heartrate measurements through various indexes.

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

Indexes	o3	o4	o5	o6	Limit values
MTHR	190	189	192	179	INBAR 205,8-(0,685xage)
HR max	99	132	163	179	WHO. Over 145 bpm for 5 minutes max
HR99	99	128	152	125	INRS. 140 hpm
RCC99	99	54	77	60	Monod.50% for 30min
HR av.	99	99	114	99	INRS. 105 hpm women Men 100hpm
ACCav.	32	34	49	34	Monod, Lehman 30 bpm
RCCav.	99	27	38,5	30	Chamoux, heavy from 30%.

From RCC averages and RCC 99 results, we determined a cardiac cost profile. Three profiles (Acceptable – Quite heavy – Excessive) are defined (Meunier, 1997) according to the values of RCC99 and RCCav. Figure 28 shows the cardiac cost profile for operators o3, o4, o5, o6.

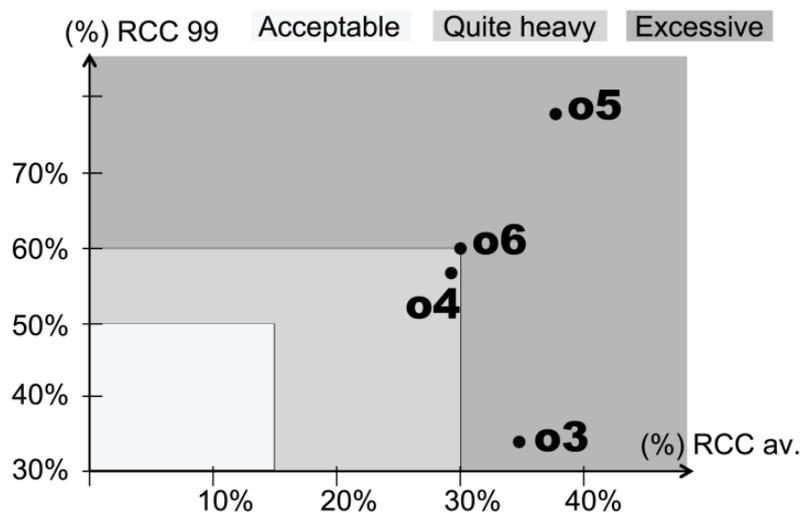


Figure 28. Profile of cardiac cost of related task for operators o3 to o6.

For operators o5 and o3, the profile is clearly excessive. For the operator o6, his profile is at the limit between quite heavy and excessive. For the operator o4, the profile is quite heavy.

These results of heavy cardiac costs through different profiles validate the need of customized solutions to reduce strain.

1.2.3.3 Experiment 3: does the wearing of an exoskeleton have an impact on cardiac cost for this task?

The PAD chosen for further tests was selected by its ability to reduce upper body strain according to a study ordered by *SkelEx* and realized by an independent laboratory (Van Geer, 2016). Furthermore, this choice is imposed by a company's exclusive partnership framing the project. Concerning operators' posture, hands above shoulders is referenced as deleterious according to ergonomic standards (Luque-Casado et al., 2016). In addition, OSHA checklist which evaluates MSD upper limb risk indicates a value of 19. A score >5 indicates a need for ergonomic intervention (OSHA Checklist, 2010). Figure 29 shows our approach to determine the right physical assistance system according to the observed posture.

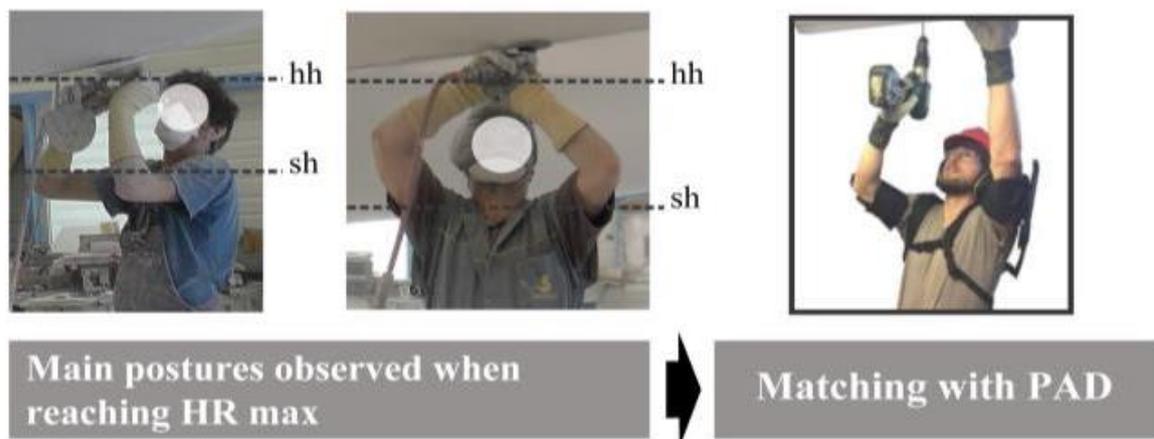


Figure 29. Process of identifying an adapted PAD for the observed postures. Hh = Hand height; sh = shoulder height. The PAD selected is a prototype of *SkelEx*.

The comparative study on two operators (operator o7 and o8) shows that wearing the PAD has an effect on cardiac cost. Firstly, we compare extreme hear rates with/without PAD. Secondly, by comparing the cardiac cost values for the two phases of work (with/without wearing the PAD), we found for both operators a decrease of cardiac cost when wearing the PAD. We concluded that all the results for extreme and averages indexes values are inferior when wearing the PAD. Figure 30 shows the evolution of heart rates during the two compared phases of work for operator o7: with/without PAD. The blurred period in the middle represents the phase where taking off the PAD. This phase was ignored in the analysis. The results show for operator o7, the results show that when wearing the PAD, the average heart rate (HRav. = 94 hpm) is lower than without PAD (HRav. =102.4 hpm). We observe the same trend with the results of operator o8: during the phase with PAD, the average heart rate (HRav. = 79 hpm) is lower than without PAD (HRav. = 85 hpm). For both operators, relative cardiac costs are decreasing with a PAD: for operator o7 RCCav. = 18.6% with PAD and RCCav. = 32.1% without PAD. That means for operator 7 a decreasing of HRav. = 13.5% with PAD and a decreasing of CCRav. = 5.9% with PAD for operator o8.

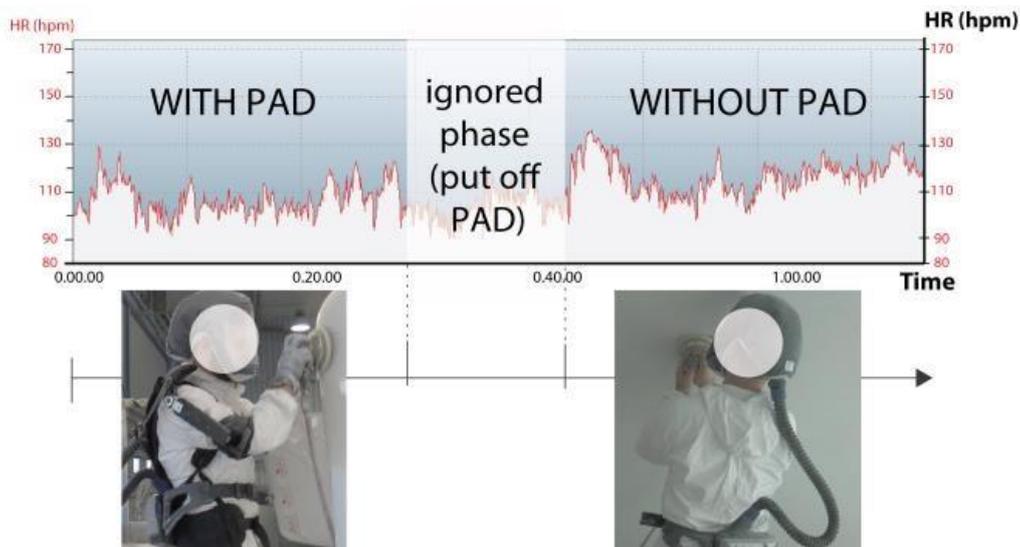


Figure 30. Evolution of operator o7 heart rate measured for the usual tasks wearing the PAD at first then without PAD.

The Table 6 shows four colons indicating results with and without PAD for both operators. The first three lines show the extreme values (MTHR, HRmax, HR99) and the following lines show the averages (for RCC99, HRav., ACCav., RCCav.).

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

Table 6. Experiment 3: results of cardiac cost values for a comparative study on two operators.

Indexes	o7 with PAD	o7 without PAD	o8 with PAD	o8 without PAD	Limit values
MTHR	190	190	192	192	INBAR 205,8-(0,685xage)
HR max	128	145	98	110	WHO. Over 145 bpm for 5 minutes max
HR99	128	138	98	108	INRS. 140 hpm
RCC99	51,5	59	33	42	Monod.50% for 30min
HR av.	94	102,5	79	85	INRS. 105 hpm women Men 100hpm
ACCav.	34	42,5	19	25	Monod, Lehman 30 bpm
RCCav.	18,6	32,1	16	21,9	Chamoux, heavy from 30%.

Figure 31 (a) shows the comparison of heart rates for operator o7 and o8 with (w) and without (wo) DAP. (b) shows the comparison of RCC99 and cardiac cost averages.

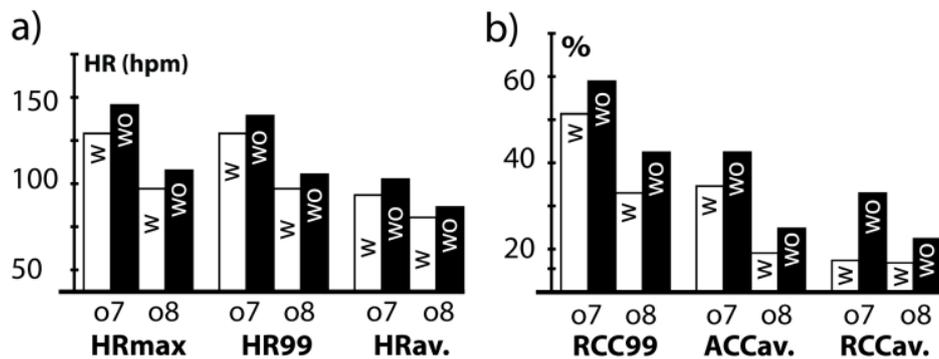


Figure 31. a) Comparison of extreme heart rates for operator o7 and o8. With (w) PAD and without (wo) PAD. b) Comparison of RCC99 and cardiac cost averages.

Figure 32 shows cardiac cost profiles of operator o7 and o8 for the two comparative phases. The results show that for operator 7, his profile level decreased from excessive to quite heavy with a PAD.

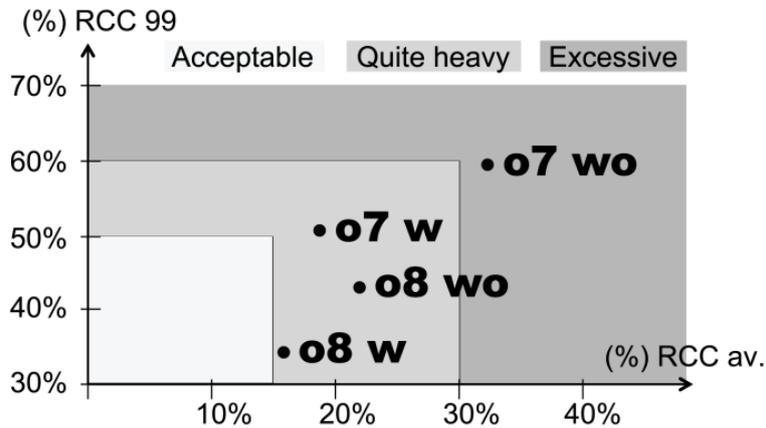


Figure 32. Cardiac cost profiles for operator o7 and o8 for the two comparative phases with (acceptable) PAD and without (wo) PAD.

Perceived exertion ranking questionnaire: After cardiac cost experiment, a Borg scale survey (CR10) has been carried out with 7 participants. This subjective rating of strain showed that all operators perceive the work along the sealing edge under the boat as the most demanding phase. This top strain phase is ranked as following: o1(8/10), o2(7/10), o3(6/10), o4(6/10), o5(05/10), o6(10/10), o7(7/10). We can conclude that we have the same trend for this subjective method than for cardiac cost measures that also targeted these phases. 7/7 participants wrote improvement wishes focused on: arm support comfort, back comfort and integration of their ventilation masks. However, four participants felt some light strain in the wrists.

Task related usability questionnaire: The results for the qualitative questionnaire on the first two operators measured showed a global satisfaction for their first experience with the product. Both operators ranked their global satisfaction around 5,5/7. The extra four operators confirmed this tendency with a ranking of about 5,5/7 for two of them and one of them ranked about 5/7. These results show a global acceptance among operators' work even if a lot of improvements have to be done. All participants asked for improvements focused on: arms and back comfort, easier installation and integration of their ventilation masks.

1.2.3.4 Discussion and future work

This study identified the most demanding phase of work among operators in an industrial environment and validates the positive impact on cardiac cost of a prototype of Physical Assistance Device. However, we must repeat it on a panel of operators and use statistics to prove the significance of the effect of the PAD. Cardiac cost is not the only way to evaluation physical workload. Local strain should also be investigated.

1.2.3.5 Limitations and perspective

The curves indicate high variations that would be interesting to link more precisely to postures and applied pressure on boat hull to have more accurate information about posture influence of cardiac cost. Moreover, the comparative study needs to be done on multiple volunteers to confirm the trend. The PAD tested seemed useless for the task where the arms were under the shoulders, so that questions the ability of the product to be easy to don/doff in order to be integrated in their daily work.

1.2.4 Conclusion

Firstly, from the proposed methods, we could identify some interesting contributions to PAD evaluation such as a positive impact on physical workload. Secondly, our complementary experiments for cardiac cost helped us to design an easily repeatable protocol using short times of testing. This first step of diagnostic of Human-PAD system is positive, especially proving a physical help for manual tasks. This first positive contact with operators and this first evaluation iteration will prepare fertile feedback for designs in further steps.

1.2.5 References

- Borg, G. A. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2, 92-98.
- Borg, G.A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14, 377-381.
- Boudet, G., Dutheil, F., Chamoux, F (2014) Le coût cardiaque physiologique : un indicateur objectif de pénibilité valide, *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, Volume 75, Issue 3, p9, ISSN 1775-8785.

3. Étude préliminaire sur l'impact physique d'un exosquelette

- de Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S., & O'Sullivan, L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59, 671-681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>.
- Delaval, K., Larroque, D., Ravallec, C., Vaudoux, D. (2017). Les dispositifs d'assistance physique. *Travail & sécurité*, 788. Editions INRS.
- Eston, R.G., Williams, J.G. (1988) Reliability of ratings of perceived effort regulation of exercise intensity. *British journal of sports medicine*, 22: SSISA, Newlands, 7725, South Africa. 153-5.
- EU-OSHA. (2010) *OSH in Figures: Work-related Musculoskeletal Disorders in the EU - Facts and Figures*. European Agency for Safety and Health at Work.
- Gellish, L. (2007) Longitudinal Modeling of the relationship between Age and Maximal Heart Rate. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39:822-9.
- Hill, G., Bittner, C., Iavecchia, P., Byers, C., Zaklad, L., Christ, E. (1992) Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *The Journal of the human factors and ergonomics society*. August 1992.
- Inbar et al. (1994) Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20- to 70-year-old men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26, 538-546.
- Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, W., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., Jørgensen, K. (1987) Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms; *Applied Ergonomics*, pp. 233-240.
- Luque-Casado, A. et al. (2016) Heart rate variability and cognitive processing: The autonomic response to task demands. *Biological Psychology*, 113, pp.83-90.
- McAtamney, L., Nigel Corlett, E. (1993) RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*. Volume 24, Issue 2, April 1993, pp 91-99.
- Meunier, P. (1997) *Protocole pratique de mesurage et d'analyse cardiofréquencemétrique*. Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP) , 3, pp. 287-293.
- Meunier, P. (2014). *Cardiofréquencemétrie pratique en milieu de travail : Une approche objective de la pénibilité professionnelle*. Éd. Docis.

Nielsen, J. (1993) *Usability engineering*. San Diego, CA: Academic Press.

Nielsen, J., & Landauer, T.K. (1993), A mathematical model of the finding of usability problems. In *Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference* (Amsterdam, Netherlands: ACM Press), pp. 206-213.

Tanaka, W., Monahan, K.D., Seals, D.R. (2001) Age predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37, Issue 1.

Van Geer, F.J. (2016) Performance testing of the *SkelEx* funded by STW Take Off grant awarded to *SkelEx*.

2 Conclusion du chapitre 3

Cette pré-étude de quantification des effets du port de l'exosquelette sur la charge physique globale a mis en valeur une réduction de la sollicitation cardiovasculaire, indicateur de la pénibilité globale. Un seul indice plus simple du coût cardiaque pourrait être utilisé sur une tâche bien ciblée, en vue d'étudier des relations statistiques. Une réduction de l'effort global perçu a été constatée par l'ensemble des opérateurs, bien que 4/7 aient perçu une légère augmentation des efforts vers les poignets. A la suite de la présentation de ces résultats au groupe projet, un second focus group (6 personnes) a été mené et a confirmé la volonté d'intégrer des exosquelettes sur les postes ciblés. Grâce à l'effet globalement positif de l'exosquelette, la société Europe Technologies a été autorisée à continuer le travail de recherche sur le site de Bénéteau. En revanche, un point de vigilance est ressorti sur la capacité des opérateurs à réellement s'approprier la solution et à l'utiliser au quotidien. En effet, les résultats des interviews ont révélé des facteurs importants pour les futurs utilisateurs comme le confort physique ou la compatibilité à leur équipement existant. Pour assurer l'adoption de l'exosquelette sur ce terrain, il s'agit non plus seulement de prouver un effet positif objectif, mais également d'identifier et d'évaluer les critères d'acceptation pour un usage réel. Ce sera donc la prochaine étape de notre travail de recherche.

Chapitre 4

Étude exploratoire des facteurs d'acceptation et expérimentation de méthodes de mesures

Ce chapitre présente le travail réalisé sur l'acceptation des exosquelettes pour une utilisation professionnelle. Nous présenterons tout d'abord les enjeux d'une telle étude, avec un rappel des notions principales utilisées pour la recherche puis nous présenterons un article publié dans le journal *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors* en Octobre 2019. Cet article présente la méthodologie utilisée pour identifier les facteurs d'acceptation sur le terrain. Les résultats de cette recherche sont formalisés par la proposition d'un modèle organisant les facteurs et leurs méthodes de mesures. Ces résultats seront utilisés ensuite dans le chapitre 5.

1 Enjeux de l'étude

En parallèle de résultats objectifs validant la fonctionnalité de l'exosquelette, nous avons dû observer les utilisateurs potentiels pour comprendre comment évaluer le système dans l'environnement de travail, de manière globale (utilisation, compatibilité avec l'environnement...). Afin de comprendre quels étaient les freins ou au contraire les leviers à activer pour favoriser une bonne intégration du dispositif, nous avons proposé une approche de recherche écologique. De plus, l'utilisateur final ayant 'le dernier mot' sur l'utilisation ou le rejet de la solution, la méthode de recherche devra être centrée sur l'usage. Pour cette raison, nous avons proposé une méthode inspirée des principes d'implication de l'opérateur en conception présentés chapitre 2, section 3. Cette méthode inclut donc : une approche systémique de la problématique, la participation active des utilisateurs, des étapes itératives, des tests/simulations.

Dans cette étude, nous avons exploré auprès de potentiels futurs utilisateurs, les facteurs qu'ils considéraient comme importants pour adopter la solution. Nous nous sommes basés sur le modèle de Nielsen couramment utilisé dans l'industrie ([Chap. 2, section 2.3.1](#) Les critères d'évaluation de l'Utilisabilité) et qui se concentre sur l'étude l'utilisabilité, elle-même déterminée par des facteurs comme la facilité d'apprentissage ou la facilité d'utilisation. Il s'agit sur cette phase exploratoire d'identifier de manière participative et itérative les facteurs d'acceptation et de les mesurer. Dans cette étude, nous proposerons donc une modélisation de ces facteurs ainsi qu'une méthode de mesure associée (objective ou perceptive). Pour les mesures perceptives, un questionnaire sera proposé. Il sera discuté de manière participative à travers les différentes étapes de l'étude, pour s'accorder sur les questions et leur formulation. Cette exploratoire a été publiée dans le journal IISE (Moyon, A., Petiot, JF., Poirson, E., (2019). *Development of an Acceptance Model for Occupational Exoskeletons and Application for a Passive Upper Limb Device*. IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 1-11. 10.1080/24725838.2019.1662516).

Development of an acceptance model for occupational exoskeletons and application for a passive upper limb device

Aurélie Moyon^{a,b}, Jean-François Petiot^a, Emilie Poirson^a,*

^aEcole Centrale de Nantes, LS2N (UMR CNRS 6004), 1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3, France ^bEurope Technologies, 2 rue de la fonderie, 44470 Carquefou.

Occupational application

Occupational exoskeletons may help reduce the physical demands of work, but several challenges exist in their workplace integration. While there is evidence that wearing an exoskeleton can reduce perceptions of effort and muscle fatigue, exoskeletons can negatively affect user acceptance if they increase local discomfort or don't provide sufficient adjustability. Additionally, most existing evidence is from laboratory settings, which has unknown validity for real work activities. To address these limitations, we completed a field study to identify key acceptance factors in real contexts of use, as well as methods for measurement. From our results, we present acceptance factors in a model centered on four aspects concerning the use of an occupational exoskeleton, a global methodology for factor identification, and propose easy measurement methods for practitioners. These outputs provide new ergonomics specifications for Human-Exoskeleton Interaction (HEI) in the early use stage.

Technical Abstract

Background: To address the high costs of work-related musculoskeletal disorders (WMSDs), several industries have started to experiment with exoskeletons, but have faced technical and psychological barriers. The design of efficient and usable exoskeletons needs to account for both technical constraints and more subtle requirements related to their acceptance by users. Existing models of acceptability, essentially based on predictive methods and information sciences, were not considered relevant for the case of occupational exoskeletons. Purpose:

The purpose of this study was to specify an acceptance model adapted to occupational exoskeletons, in order to facilitate their evaluation during the initial phase of use in the field. Methods: We employed an ecological approach. Because of the physical interaction the user experiences with an exoskeleton and within the working situation, acceptance criteria were developed from actual field use. Initially, an action research process was completed to identify key determinants in the field. New factors, missing in existing acceptability models, were added to a proposed new model, together with methods for their measurement. To test the new model, an experiment was completed on manual operations in an industrial context and partly in a laboratory. Results: We organized the identified factors into an acceptance model, which was then validated and completed by exoskeleton experts in ergonomics based on four aspects: physical, occupational, cognitive, and affective. Conclusions: This new model, focused on usability, is based on easy-to-implement methods and could, therefore, be of use to diverse stakeholders (exoskeleton designers, ergonomists, etc.). Based on a real use approach, such a model makes it easier to evaluate the Human-Exoskeleton system, and could thus facilitate more successful adoption by companies.

2. Introduction

2.1 Context

An occupational exoskeleton is an external, wearable structure intended to decrease physical demands during work activities (Perry et al., 2007). There is an increasing demand for exoskeletons in industry, but their integration in companies is quite slow in many cases, due to barriers such as mechanical challenges (Gopura & Kiguchi, 2009); poor usability compared to expectations (Maciejasz et al., 2014); human and organizational challenges (Delaval et al., 2017). Recently, some studies have shown benefits of exoskeleton use, such as a decrease in muscle activity, perceived muscular effort (Huysamen et al., 2018) and perception of fatigue and an increase in worker performance (Spada, et al., 2017). However, research has shown some potential limitations such as the need for better adjustability to reach higher user acceptance (Baltrusch et al., 2018) or a structural counterbalancing toward the ground. If they might help reduce the load on specific parts of the body, they could also increase the load on other regions of the wearer's body (Rashedi et al., 2014). They also could increase perceived difficulty in specific tasks (Baltrusch et al., 2018) which could lead to important limitations in the

industrial environment. Such evidence suggests that exoskeletons are not yet widely adopted for occupational use.

2.2 Focus on acceptability and usability

The acceptability (judgment before use) of exoskeletons, as a new technology, could involve multiple, diverse factors. The most commonly used model in industry is Nielsen's (1993) model, which is mainly structured around practical acceptability and usefulness. Usefulness is the degree in which a person trusts the technology to perform the desired goal, and in Nielsen's model is broken down in two further notions: Usability and Utility (Figure 33).

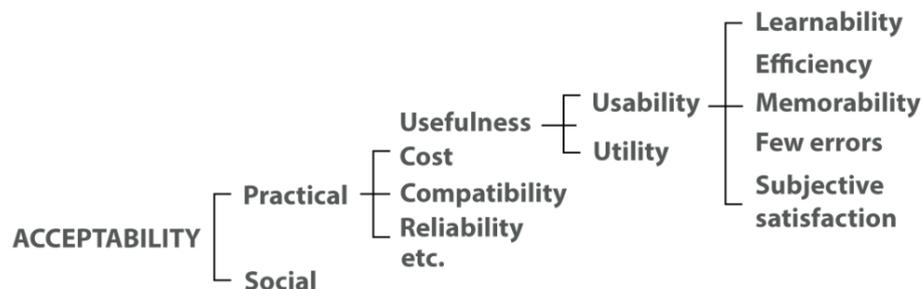


Figure 33. Nielsen's (1993) model of system acceptability (M1).

More recent predictive theories of technology, such as the Technology Acceptance Model (TAM; Davis, 1989) or the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT; Venkatesh et al., 2003), are also based on a priori studies. Some more recent research in Informative Sciences, based on acceptance, focus progressively on real use and adoption (Venkatesh et al., 2012). The emerging theory of "situated" acceptance proposes to consider four dimensions (individual, organizational, relational, professional/identity) of the occupational activity in the field of social psychology (Bobillier Chaumon, 2016) and explains how acceptance factors should be engineered by confronting a real context. Unfortunately, little research has been reported on acceptance – the judgment toward a product after use – where both functional and perceptive factors are studied during first use (familiarization phase).

These existing models are used to study mature and similar informative technologies, whereas innovative devices, such as exoskeletons, change the framework of acceptance through a new user-product relationship (Akrich, 1989). Moreover, some appropriation theories in activity ergonomics explain that it is the actual experience of the product that will influence future

behavior and future adoption (Rabardel, 1995). In addition, the acceptance of non-digital systems needs to consider physical and environmental aspects. The exoskeleton is designed to assist a particular posture. Consequently, we are studying a 'Human-Exoskeleton' System (HES) in a particular environment, and for a particular task. This consideration of 'interfacing' is why we believe that existing models of acceptability/acceptance are not sufficiently adapted to physical user-product experience in the occupational environment.

Consequently, there is a need to involve real work situations to identify important determinants of exoskeleton acceptance (Graham et al., 2009), and a more holistic and usability focused approach is needed to identify obstacles to worker acceptance that are not evident in a laboratory environment (Bosch et al., 2016; Spada et al., 2017). Supporting these needs is recent research showing that user acceptance of an exoskeleton was strongly influenced by perceived usability (Hensel & Keil, 2019). When assessing the "expected" effects of a passive exoskeletal vest, recent authors suggest focusing on the actual use, which will also include "unexpected" effects (Kim et al., 2018). This is why we argue that the evaluation of acceptance factors should focus on Usability (the experience of use).

To improve usability implies determining which factors are the most important for users (Mayhew & Mayhew, 1999), and is why we have recommended a user-centered approach to study various aspects of an acceptable Human-Exoskeleton Interaction (HEI) at the early stage of use. Some research on Usability assessment proposed to reorganize factors for a more holistic approach. (Bengts, M.K., 2004) proposed a classification of usability factors (learnable, error preventing, efficient, memorable), together with several principal concepts from the Human-Computer Interaction (HCI) literature, to structure the scope of usability with three aspects: affective aspects, utility aspects, and cognitive aspects. We will rely partly on this hierarchy to help classify factors after interviews during focus groups with the project team.

The purpose of the current study was to identify the key factors of acceptance in the early phase of exoskeleton use (familiarization phase) and to enrich existing models presented within a real use situation and a non-digital interaction centered on usefulness/usability, and to generate a classification of factors created from both user's subjective satisfaction and experts. For these reasons, we choose the original Nielsen's model as a starting point. It is mainly developed around practical acceptability and usefulness/usability, includes user's satisfaction, considers the early phase of use, and is commonly used among our partners.

3 Method and Results

3.1 Overview of Model Development and Context for Case Study

The objective of the current study was to identify acceptance factors and organize them to adapt Nielsen's model in the early stage of exoskeleton use, along with easy measurement methods for practitioners. In order to define relevant acceptance criteria regarding our context, we developed a general methodology composed of several Stages (Figure 36). Each Stage involved gathering information, from either a field approach, laboratory study, or a literature analysis. To start, in Stage 0, an initial model (M1) was used, based on the literature and stemming from the Usability component of Nielsen's Model (Figure 34). Determinants of acceptance emerged initially, in Stages 1 & 2, and subsequent Stages developed and tested related assessment methods. After testing in Stage 4, a few new factors emerged, as they were rephrased in a model (Stage 5) and discussed with experts (Stage 6). This work was completed within a case study (boat manufacturing task), involving both field and laboratory-based testing.

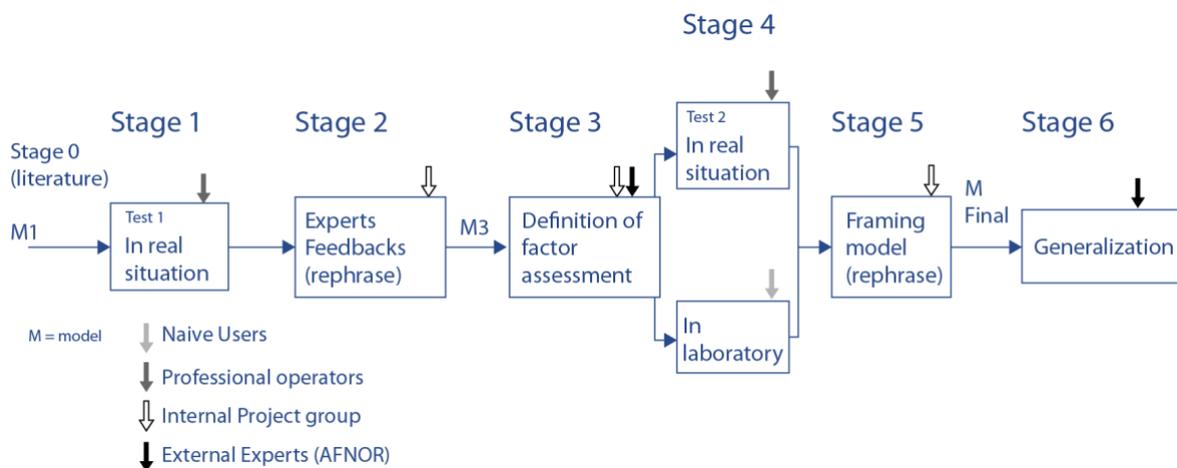


Figure 34. Overview of the methodology used to develop the new exoskeleton acceptance model. This iterative process goes from M1 to M Final.

BJ Technologies, a boat manufacturer, allowed us to conduct experiments in the finishing workshop of its catamaran Lagoon. Roofs and hulls were done separately, and we focused our observations at a workstation dedicated to hulls (Figure 35). Finishing tasks include iterative phases of sanding and polishing, followed by painting using a spray gun. The work zones are along the sealing edge of the two boat parts. This particular workstation required overhead

work postures that could be assisted by an exoskeleton. We chose a passive exoskeleton for the upper extremity, designed to assist during tasks with raised arms, which was provided by *SkelEx* (SkelEx, Rotterdam, Netherlands). Both the field and lab experiments described below were approved by the project group, composed of two members of the Health, Safety and working conditions committee, an ergonomist, two workshop managers, a safety manager, and a project manager. All participants volunteered, and informed consent was obtained by Health and Safety executive members of the project group. We had a panel of 11 operators in a real situation.

A controlled laboratory experiment was used to measure some factors more easily and without disturbing the manufacturing process. A boat mock-up was created, with appropriate surface shapes and density. To require similar postures to those observed in the field experiment, the structure was adjustable in height. We had a panel of 6 operators in the laboratory.

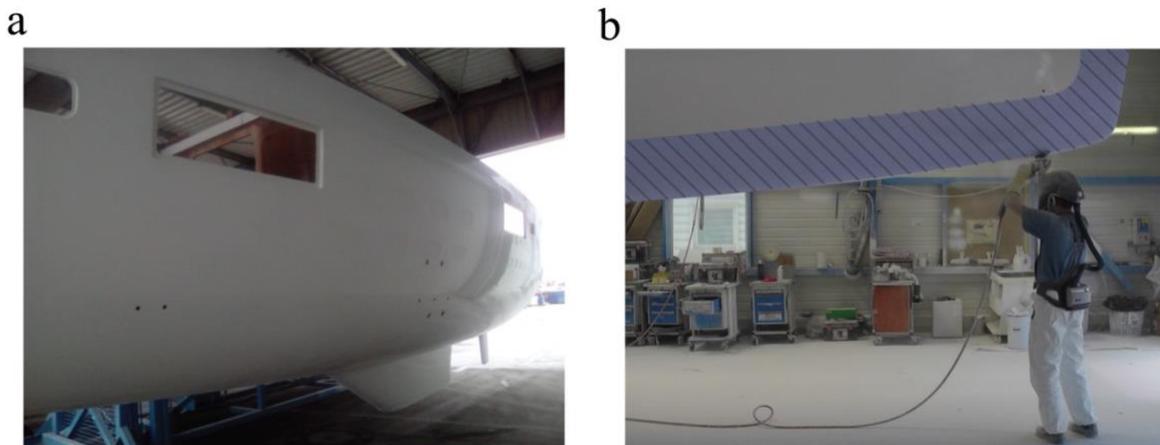


Figure 35. (a) Side view of the catamaran hull. (b) An operator is sanding the sealing edge. Hatches show the work zone for manual sanding.

3.2 Stage 1: Observe and analyse the occupational context

Initial testing (Test 1) was completed, which included two parts. In the first part, we first identified the most physically demanding aspects of the work situation based on occupational ergonomic analyses. In the second part, we completed interviews with field operators, who were asked to identify and classify their own acceptance factors after a familiarization phase.

Ecological observations of two operators were completed while they worked for a whole day. An observation grid (number of arm release, postures) has been filled. Then, we confirmed the

most demanding tasks observed using an interview. The OSHA Checklist (OSHA, 2017) and the RULA method (McAtamney & Nigel Corlett, 1993) were used to estimate the physical demands related to the risks of musculoskeletal disorders (MSD). Posture analysis yielded a score of 7 (using the RULA method), which indicates the necessity of an ergonomic intervention and justifies the need for assistance. This step allowed us to focus on the “finishing task, under the boat” as the most demanding task (Figure 35b).

We introduced the exoskeleton and its functionalities through a familiarization phase of about 15 minutes to all 11 operators, wherein we demonstrated and commented on the don/adjust/doff process. Operators verbalized individually a target duration they would consider satisfying. This reference value was called the ‘target time’. Then, we recorded the process and compared it to their target time. Records ended when participants considered the exoskeleton was adjusted and they were ready to work. Then they familiarized themselves with it by completed some simple gestures for about 5 minutes. This step provided reference duration for ‘ease of learning’ measurements (see C1 in Table 1).

All 11 operators then completed an open interview, during which acceptance factors were verbalized, based on a description of the finishing task (actions, duration, etc.) and the type of physical demands each operator encountered. Factors verbalized by operators during these interviews were centered on the utility, usability, comfort, and suitability of the exoskeleton in the industrial environment. They then completed additional interviews, using a self-confrontation method (Argyris & Schön, 1991). The following four categories were redefined with the operators in the self-confrontation interviews: 1) Utility (practical ability of the system to function); 2) Comfort (perceived fitting on body); 3) Usability (easy to don/adjust, use, doff, and store); and 4) Impact on activity (effects that can occur in the work environment, such as process disturbances, tools accessibility and compatibility, and safety for the environment). Lastly, the operators were asked to distribute 100 total points to indicate the relative importance of the revised acceptance factors.

To conclude Stage 1, we interviewed project group members to rephrase and cluster the acceptance factors identified from the field. Measured duration converged to 50 and 31 seconds for don/adjust and doff, respectively. Results from the distribution of the 100 points among the four acceptance categories indicated that Utility (50%) was the most important, followed by Comfort (24%), Usability (15%), and Impact on activity (11%). Each of these factors was thus considered necessary to integrate into the new acceptability model.

3. 3 Stage 2: Obtain expert feedback & rephrase factors

An internal group was formed, composed of six individuals with varying expertise (nurse, ergonomist, workshop chief, health and safety managers, and project director). A discussion was conducted among this group, to rephrase factors from the literature: as the starting acceptability model (M1) was focused on Usability, we used this Stage to translate Usability factors from the information science literature to our occupational exoskeleton context. We based this rephrasing on literature analysis and field expertise. We confronted usability factors from Bengts (2004) to our occupational exoskeleton context, to integrate the diverse aspects of usability: affective, utility, and cognitive, as well as the specific aspects of occupational use. These factors were discussed with the project group to validate their integration into a new model M2 (Figure 36).

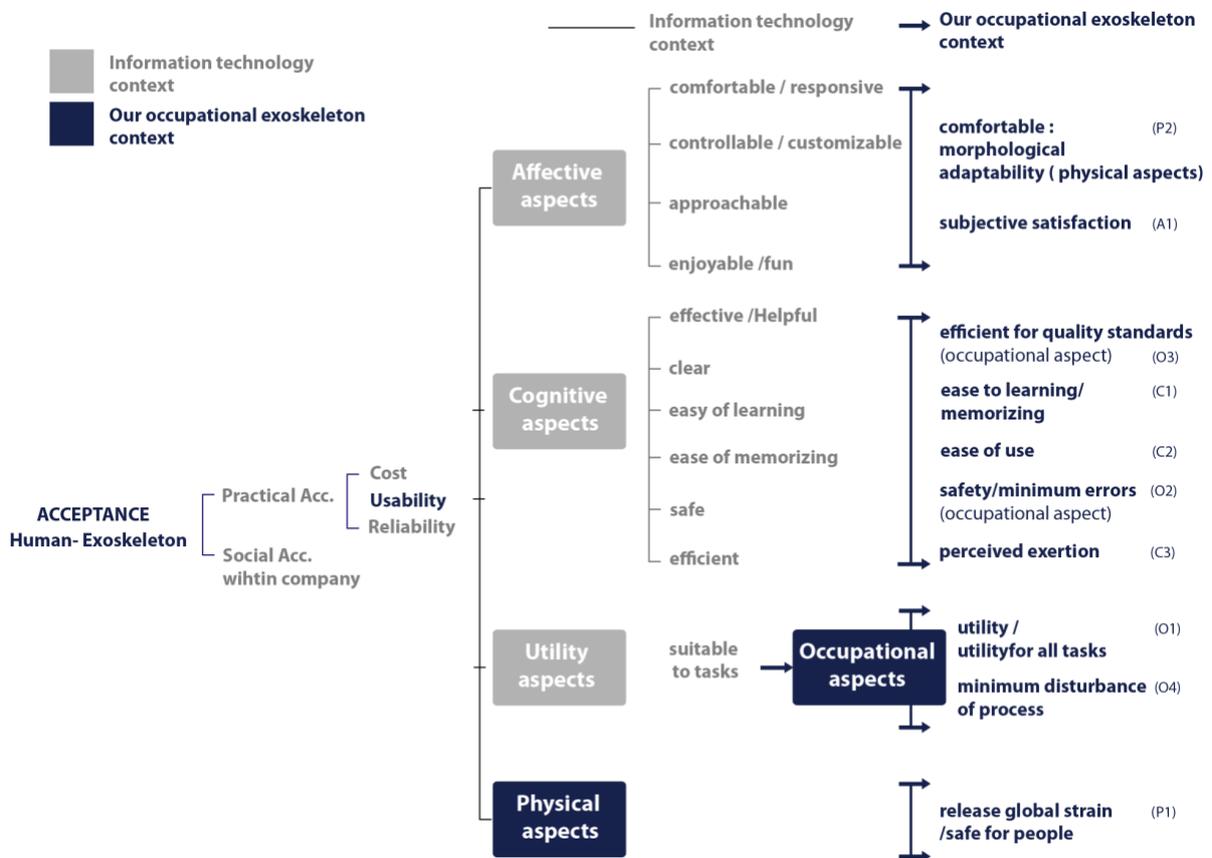


Figure 36. Model M2 generated from literature application to case study and field study.

Most of the factors from the information sciences context were directly transferable. For example: 'easy to remember' could be the decreasing of donning/adjusting duration. 'Comfortable' (responsive) could be translated as 'Comfortable' (a physical aspect). The physical aspect could integrate all factors related to wearable aspects of an exoskeleton (comfort, physical safety, etc.). Utility aspects were directly translated to Occupational aspects (utility for tasks...). Utility aspects were translated as Utility for occupational context, rephrased in Occupational aspects. This category could contain the efficiency for high-quality standards, minimum errors due to the exoskeleton, Utility for the task and other tasks (flexibility), and minimum process disturbance. However, we would not be able to consider all the 'enjoyable factors', such as 'fun' and 'entertaining', because we are working in an occupational context. In this first approach, we did not consider any hierarchy between factors.

3.4 Stage 3: Define measurement methods

Methods for measuring each acceptability factor were obtained from the literature on usability measurement and expert recommendations. When no suitable method existed, we proposed relevant indicators related to field observation and self-confrontations. For each, we suggested an objective and/or subjective method. A questionnaire was created, derived both from potential acceptability obtained from open interview results (comfort, impact on occupational activity, etc.) and existing instruments (TAM questionnaire for perceived ease of use, perceived usefulness, etc.).

The experts involved in this Stage and the next were members of a project group on-site or of the AFNOR workgroup for the future Norm NFX35 on 'Human – exoskeleton Interaction evaluation'. This workgroup is composed of about 20 exoskeleton and occupational experts. In order to generate a relevant list of factors and associated measurement methods, we recommended existing methods that were suggested in a draft guide shared in the workgroup between 2016 and 2018. The workgroup suggested a range of qualitative and subjective measurements from the Human Factors literature. When no method existed, we suggested a method to the project group. This new research iteration was organized as follows: 1) we gathered observational data on activities; 2) we proposed a factor and measurement method from what we observed, and 3) we validated or modified the factor and related measurement method by a confrontation between operators and experts group project. From these iterations, a list of 10 factors was defined with associated measurement methods (objective or subjective).

The final list of factors and measurement methods is provided below (Table 7). For example, our case study observations showed that operators were relaxing their arms by lowering them. So, we suggested we could measure the number of such “arm releases”. Self-confrontation confirmed that it was an indicator for Utility. We thus supported the measurement method ‘number of arm releases’ as an evaluation criterion for ‘Utility’. Perceived ease of use is recorded by counting the number of verbal complaints during a test. Likert scales are used to assess the Ease of learning, Cognitive impact, Utility/Utility for all tasks, Safety, Efficiency, Impact on activity, Comfort and Perceived exertion. Overall exertion is measured by asking operators to describe all the tasks and to identify which tasks were the most difficult before the experiments. All factors are evaluated after a minimum period of 15 to 30 minutes.

Table 7. Intermediate proposal of measurement methods for each acceptance factor (stage 3).

Factor	Objective measurement	Method	Subjective measurement	Method
Affective aspects				
A1. Global Satisfaction			Evaluate satisfaction and social image after 15 - 30 min of work with the exoskeleton	Open interview, survey (Likert scale). Distribution of 100 points.
Cognitive aspects				
C1. Ease of learning /memorizing	Don/adjust/doff duration	Measure the duration of the Don/adjust/Doff duration	Evaluate scoring after familiarization stage	Scoring on Likert scale
C2. Perceived Ease of Use	Number of complaints during the task	Counting the number of complaints	Evaluate after test with exoskeleton	Scoring on Likert scale
C3. Cognitive Impacts (perceived exertion)	Perceived exertion	Scoring of Global perceived scale Borg CR10 with/without exoskeleton	Evaluate after test with exoskeleton	Scoring on Likert scale
Occupational aspects				
O1. Utility/utility for all tasks	Number of arm releases	Observation and counting the number of arm releases	Evaluate after test with exoskeleton	Scoring on Likert scale
O2. Safety/ minimum errors	Rrors due to exoskeleton	Counting errors due to exoskeleton	Evaluate after test with exoskeleton Self-confrontation	Scoring on Likert scale
O3. Respect of quality standards	Control quality from workshop managers	Counting number of returns in workshop	Evaluate after test with exoskeleton Self-confrontation	Scoring on Likert scale
O4. Minimum disturbance (habits, process)	Task duration	Measure task duration with/without system	Evaluate after test with exoskeleton	Scoring on Likert scale
Physical aspects				
P1. Physical strain /Safe for people	Cardiac cost	Cardiac cost protocol (e.g., using heart-rate monitor)	Evaluate perceived exertion	Scoring on CR10 Borg scale
P2. Comfort/ Morphological adaptability	Number of adjustments	Counting number of adjustments	Evaluate perceived comfort	Scoring on Likert scale

3.4 Stage 4: Measure factors in field and laboratory tests

A second set of tests (Test 2) were complete, which involved an application of the measurement methods from Stage 3. Two types of testing were completed, one in the field and one in the laboratory, the latter included to minimize disturbances to the working environment and to increase the number of subjects. Testing was similar in both cases, though the duration was limited in the lab but corresponded to the natural working schedule in the field. Also, questions about occupational aspects questions were only asked in the field.

Field Testing

Eleven operators participated in the study, whose ages varied from 20 to 46 years, and each had a minimum of three months of experience. There were four females and seven males, from among the daily crew working on the same operations. Testing took place between March 2017 and April 2018, at the site of BJ Technologies in Dompierre, France. The health status of each operator was evaluated using the Nordic questionnaire (Descatha et al., 2007). Some of the participants had already sustained injuries related to their work but were in a good state of health on the day of the test.

Donning (adjusting included) and doffing duration were measured over four trials using a chronometer. These real timings were then compared to the reference values obtained earlier (Stage 1). We obtained a mean donning/adjusting duration of about 1.8 min and doffing duration of about 0.5 min. Subsequent tests were organized as follows. First, safe donning was checked visually by an experimenter, and satisfying comfort was determined by the participant while doing simple gestures. This step was mandatory to continue testing. Second, operators were allowed to move freely with the exoskeleton while reproducing simple moves then task gestures. Third, all objective measurements were made with/without exoskeleton, always starting with the exoskeleton on, during the finishing tasks on the sealing edge (Figure 37b). Operators were asked to follow their usual working process without any change, for 15 to 30 min, according to their natural operations schedule. Observations were made by visual control and notes on an observation grid, while subjective measurements were recorded before (global perceived effort) and after the task by an individual survey. Fourth, the 11 field operators were interviewed to assess how they perceived the exoskeleton and what they considered as key factors for daily use. A comparative measurement of global strain was also made, using the CR10 Borg scale (Hill et al., 1992), which was recorded before and after the task. Tasks were recorded with cameras to be analysed later. We conducted observations with an observation

grid specially designed for the activity ([Annex 4](#)) and a chronometer. All observations were written on the grid. The self-confrontations and interviews were conducted with an open interview file and questionnaires.

From the open interviews, we obtained several definitions of factors: the notion of physical aspects (body pain, morphological adaptation, etc.), cognitive aspects (perception of workload, ease of appropriation/learning, etc.), and occupational aspects (access to tools, process, and safety for the work environment).

Laboratory testing

Six male participants were included, who had no previous professional experience of sanding or polishing tasks. Their ages ranged from 29 to 56 years, and all were in good health on the day of testing, as determined using the Nordic questionnaire (Descatha et al., 2007). Laboratory testing took place between March and May 2018 in an experimental room at l'Ecole Centrale, LS2N laboratory, Nantes. An experiment manager was trained to the real task by operators, and a technical document was transmitted to the lab so that the task could be reproduced as close as possible to the real situation.

Laboratory procedures and tests material (including questionnaire) were the same as described for the field, with some exceptions. First, a portion of the questionnaire, addressing O4 "Impact on activity" (habits, process), was not included. Second, lab participants were shown how to do the specific movements and the actions required for the task. Participants practice until they could reproduce these correctly in terms of gestures and timings, visually controlled by the experimenter. Third, comparative measurements with/without the exoskeleton, were done during 15 minutes. From this stage, we had measured all of the proposed methods, and new factors appeared from the results of objective and subjective measurements as presented in Stage 5.

3.5 Stage 5: Final organization of factors

From previous stages, several factors needed to be updated into a final model. Indeed, the results of the field and laboratory measurements revealed some new factors or organization. The project group (involved in stage 2) evaluated the moderation of each acceptance factors in a focus group format. During this, verbatim transcripts from interviews and self-confrontation

were rephrased into factors, leading to a final model (Mfinal; Figure 37). For example, the following reformulations were recommended:

- 'Comfortable' is also described as: 'morphological adaptability' and 'safe for people'. Indeed, from the interviews, comfort is considered as something that fits the body as well as possible.
- The risk of supplementary stress has been rephrased as a 'light cognitive workload'.
- The potential evolution of perception (focus demand...) rephrased as 'minimum changes in perception'.
- The ability of the device not to disturb other tasks was rephrased a 'flexible with other tasks'.
- Regarding safety and organizational concerns, the project group added 'efficient for quality standards' and 'minimum disturbance of process'.

Social aspects were also mentioned, and the project group suggested a need for more evidence of social acceptability in further research. Finally, based on the expertise of the project group, the questionnaire and protocols were optimized.

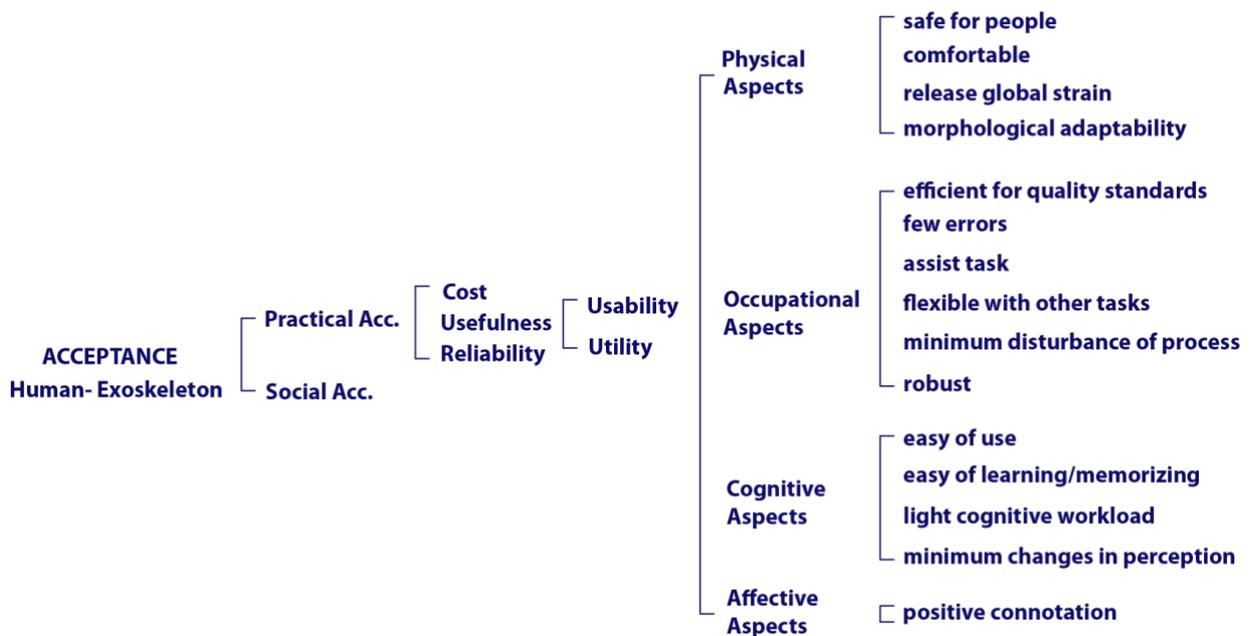


Figure 37. Final model (Mfinal) including new acceptance factors.

3.6 Stage 6: Generalization

This study considered only one case study and one model of the exoskeleton. A generalization of this work is only possible by comparison with other contexts. Indeed, the exoskeleton is designed for all sort of arm-elevated postures. Mfinal was presented to a network of occupational experts on ergonomics and on exoskeletons for validation and generalization concerning different devices. The model and associated methods were discussed through interviews with seven occupational exoskeleton experts and a focus group with project group members. They also engaged in some discussion related to acceptance factors. Proposed factors were supported, however, exchanges highlighted that some factors were missing in relation to different contexts of use and various models of exoskeleton, such as 'minimal changes of natural movement', 'hygienic', and 'compatible with equipment'.

4 Discussion

In summary, exoskeletons have great potential to relieve pain and work-related muscle workload but they are facing physical and psychological barriers. To facilitate their integration in industries, they need to be evaluated in a real context. We have modified an existing model from the field of information technology, using an exploratory field approach, in order to identify global acceptance (judgment after use) and usability factors for the exoskeleton. Then we have measured them and validated factors relevance with experts to better understand human-exoskeleton interaction (HEI). From this method, we recommended a new model which includes physical aspects, occupational aspects, cognitive aspects, and affective aspects. Each aspect is related to a factor (easy to learn, comfortable, etc.) that is easily measurable.

Through this study, we have identified that an exoskeleton, as physical assistive technology, might require some attention to usability and specific acceptance factors. We found that the main acceptance factor from the user perspective is related to physical comfort. This finding highlights the need to evaluate physical aspects and the importance of subjective perceptions in the evaluation of this new technology, intended to decrease occupational physical demands. Several studies, including ours, have measured some dimensions of usability and suggest that a more holistic approach should be developed. A recent field study (Hensel & Keil, 2019) confirmed that acceptance ratings decreased at the end of the study, which could be related to the learning experience. This explains why predictive methods are not relevant in the case of exoskeletons, as there is no experience of use. Some research focused on usability suggests

that the introduction of innovative systems should be studied from a user perspective (Redström, 2006; Vardouli, 2015). Subjective satisfaction and acceptance factors should actually be studied during use (Bobillier Chaumon, 2016).

The added value of this study is to explore, through real situations, several unanswered questions related to exoskeleton acceptance, such as: What are the satisfaction factors from the user perspective? What is meant by 'easy to learn', and how should this be measured? What does 'Utility' mean for an exoskeleton, and how can we measure it? We give insights and examples of how we can better understand acceptance factors and measure them. However, our initial explorations have highlighted the possibility of encountering more acceptance factors, which should be identified and adapted for occupational exoskeletons in future work. We suggest there is a need to watch for more complex aspects of interactions between operators, for example regarding how to evaluate any social aspects of exoskeleton use. Additional work remains, such as determining factor accuracy, the choice of acceptance indexes and their validity, the reliability and validity of questionnaires, the hierarchy of factors, and how to verify model generalization. In addition, the evolution of exoskeleton acceptance factors could be evaluated in future studies through a longer period of use.

Despite these limitations, we believe that our study has raised human factor awareness among our partners, to whom we have recommended developing an integration protocol based on our model of acceptance. This work will be discussed collectively for further completion and might evolve regarding use cases and measurement results in the future. We note that even if the final model presented here might not be complete, we suggest using it as a first guide to facilitate the evaluation of these assistive systems since it requires only simple measurement methods, tested in real situations. Based on a real-use approach, this user experience approach could enhance the evaluation of the Human-Exoskeleton System, thus supporting a successful adoption by final users.

5 References

- Akrich, M. (1989). La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques. *Anthropologie et Sociétés*, 13, 31-54. <https://doi.org/10.7202/015076ar>.
- Argyris, C., & Schön, D. (1991). Participatory Action Research and Action Science Compared : A Commentary. In W. Whyte, *Participatory Action Research*. 85-96. SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412985383.n6>.
- Baltrusch, S.J., van Dieën, J. W., van Bennekom, C.A.M., & Houdijk, W. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.007>.
- Bengts, M.K. (2004). Usability as a constituent of end-user computing satisfaction [Master's Thesis, University of Jyvaskyla].
- Bobillier Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : Premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22, 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>.
- Davis, F.D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13, 319. <https://doi.org/10.2307/249008>.
- Delaval, K., Larroque, D., Ravallec, C., Vaudoux, D. (2017). Les dispositifs d'assistance physique. *Travail & sécurité*, 788. Editions INRS.
- Descatha, A., Roquelaure, W., Chastang, J.-F., Evanoff, B., Melchior, M., Mariot, C., ... Leclerc, A. (2007). Validity of Nordic-style questionnaires in the surveillance of upper-limb work-related musculoskeletal disorders. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 33, 58-65.
- EU-OSHA. (2010) OSH in Figures: Work-related Musculoskeletal Disorders in the EU - Facts and Figures. European Agency for Safety and Health at Work.

- Gopura, R.A.R.C., & Kiguchi, K. (2009). Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties. 2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics, 178-187. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209630>.
- Graham, R.B., Agnew, M.J., & Stevenson, J.M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40, 936-942. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.01.006>.
- Hensel, R., & Keil, M. (2019). Subjective Evaluation of a Passive Industrial Exoskeleton for Lower-back Support: A Field Study in the Automotive Sector. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-9. February. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1573770>.
- Hill, S.G., Iavecchia, W.P., Byers, J.C., Bittner, A.C., Zaklade, A.L., & Christ, R.E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 34, 429-439. <https://doi.org/10.1177/001872089203400405>.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K.S., Graf, E., & O'Sullivan, L.W. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*, 70, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>.
- Kim, S., Nussbaum, M.A., Mokhlespour Esfahani, M.I., Alemi, M.M., Alabdulkarim, S., & Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*, 70, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.025>.
- Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., & Leonhardt, S. (2014). A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11, 3. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-3>.
- Mayhew, D.J., & Mayhew, D. (1999). *The Usability Engineering Lifecycle: A Practitioner's Handbook for User Interface Design*. Morgan Kaufmann.
- McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24, 91-99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S).
- Nielsen, J. (1993) *Usability engineering*. San Diego, CA: Academic Press.

- Perry, J.C., Rosen, J., & Burns, S. (2007). Upper-Limb Powered Exoskeleton Design. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12, 408-417. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2007.901934>.
- Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin, pp.239. hal-01017462.
- Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M.A., & Agnew, M.J. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57, 1864-1874. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>.
- Redström, J. (2006). Towards user design? On the shift from object to user as the subject of design. *Design Studies*, 27, 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.06.001>.
- SkelEx. (Rotterdam, Netherland). (s. d.). Site consulté le 30 mai 2019, à l'adresse: <https://acceptable.skelex.com/>.
- Spada, S., Ghibaudo, L., Gilotta, S., Gastaldi, L., & Cavatorta, M.P. (2017). Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*, 11, 1255-1262. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.252>.
- Vardouli, T. (2015). Making use: Attitudes to human-artifact engagements. *Design Studies*, 41, 137-161. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.002>.
- Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., & Davis, F.D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27, 425-478. <https://doi.org/10.2307/30036540>.
- Venkatesh, V., Thong, J.W.L., & Xu, X. (2012). Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (SSRN Scholarly Paper No ID 2002388). Social Science Research Network website. Consulté à l'adresse : <https://papers.ssrn.com/abstract=2002388>.

3 Conclusion du chapitre 4

Premièrement, cette première approche exploratoire entre mi-2017 et fin 2018 nous a permis d'identifier les facteurs clefs de l'acceptation de la future solution directement sur le terrain, pour un cas d'usage donné. Ces facteurs ont été présentés dans un modèle et classés en quatre catégories : aspects physiques (effort perçu, liberté des mouvements...), aspects cognitifs (facilité d'apprentissage, charge mentale), aspect de l'activité (apport perçu pour la tâche, performance perçue...) et aspects affectifs (dévalorisation, connotation positive...). A l'issue de cette étude, nous avons confronté le modèle proposé à notre réseau de partenaires, avec pour objectif une généralisation par des pairs. Sept partenaires interviewés ont validé la majorité des facteurs et ont proposé des facteurs supplémentaires concernant notamment l'organisation, qui est spécifique à chaque entreprise. Par exemple, le facteur 'compatibilité aux équipements existants' a été confirmé comme très important et conditionne aujourd'hui le déploiement des exosquelettes dans cette entreprise. L'intégration de l'exosquelette dans l'environnement a également été un levier d'utilisation important : il est stocké au plus près du poste et sa disponibilité est visible depuis l'extérieur. Ces deux derniers facteurs ont pu être apportés grâce à la participation de l'utilisateur final et des différentes parties prenantes du projet, au caractère itératif (proposition, test, modification/validation) de la méthodologie qui emploie des simulations d'usage, permettant de se projeter en détail dans tous les aspects de l'usage, du début à la fin du cycle d'utilisation.

Une évolution de la perception collective a été observée, avec des sollicitations de volontaires pour des tests plus fréquentes alors qu'au début de l'étude nous avons eu quelques difficultés à les recruter. Quelques opérateurs ayant eu une première expérience négative (ayant ressenti une gêne ou n'ayant pas suffisamment perçu l'assistance ou l'utilité), ne voulaient plus faire de tests. Cela révèle que le premier contact avec l'exosquelette est fondamental pour poursuivre les recherches terrain.

Afin de minimiser le risque de rejet, nous avons proposé à notre partenaire un protocole d'intégration intégrant notamment le questionnaire utilisé dans l'étude du chapitre 4. Il a été mis à jour avec le groupe projet et a été déployé en 2019. En décembre 2019, nous pouvions compter une trentaine de personnes interrogées. Concernant l'évolution des facteurs d'acceptation nous n'avons pas réalisé d'études statistiques, cependant les retours des

questionnaires et des entretiens semi-directifs à T+ 1mois et T + 2 mois d'utilisation ont permis de confirmer l'importance de certains facteurs comme 'confort physique', 'utilité' et 'adaptation aux équipements', qui sont très fréquents dans l'analyse des entretiens. La notion 'd'utilité' revient moins fréquemment, les opérateurs semblent plus se concentrer sur des aspects de l'activité comme 'adaptation aux équipements', 'l'accessibilité et la disponibilité' à l'exosquelette dans l'atelier. Ces retours sont importants, car ils montrent peut-être une progression dans l'adoption de la technologie. L'utilité est reconnue et les futurs utilisateurs se projettent vraiment dans l'usage. En effet, les besoins remontés à l'équipe projet lors des entretiens sur l'accessibilité, la disponibilité à l'exosquelette, les modifications éventuelles pour adapter les équipements existants montrent un besoin d'adaptation potentiel de la situation de travail et de suivi de l'utilisation individuelle.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons deux expérimentations sur un nouveau cas d'usage industriel : l'assemblage vertical d'éléments aéronautiques. Dans cette étude, nous étudions les effets de l'exosquelette sur la charge physique globale, la performance de l'utilisateur, les bénéfices perçus et l'acceptation en utilisant notamment le questionnaire mis à jour avec le groupe projet composé pour ce nouveau cas d'usage. Nous proposons également de tester l'efficacité d'un protocole de familiarisation, qui est un élément important de notre protocole d'intégration général.

Chapitre 5

Mesures des effets de l'exosquelette et d'un protocole de familiarisation

Ce chapitre est divisé en deux parties (Partie 1 et 2) correspondant à deux études sur le deuxième cas d'usage industriel : des opérations d'assemblage de pièces aéronautiques. Tout d'abord, un article présentera les expérimentations réalisées en laboratoire puis un second article sera consacré à la présentation d'une étude terrain sur le site d'Airbus (Nantes). Dans ces études, nous nous sommes intéressés aux effets du port de l'exosquelette lors de la réalisation de la tâche et à l'effet de deux supports de familiarisation différents sur la charge physique globale de l'opérateur (solicitation cardiovasculaire), sa performance, ses bénéfices perçus et un score global d'acceptation.

La première étude en laboratoire a été réalisée avec la variable 'Exosquelette' et les deux conditions : avec l'exosquelette (Exo) ou sans l'exosquelette (NoExo) et la variable 'support de familiarisation' avec les deux conditions : brochure (F1) et tutoriel (F2). Ce premier article a été présenté le 3 Octobre 2019 lors de la conférence HFES et est publié dans : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomic Society Europe Chapter 2019*. Une seconde étude terrain sera présentée avec l'effet de l'Exo B (prototype le plus récent) et du protocole de familiarisation (F1/F2) sur les mêmes variables (charge physique, performance...) Cette dernière partie est présentée sous forme d'un article soumis en Mai 2020 à la revue *Applied Ergonomics*. D'abord, nous allons rappeler pourquoi nous nous intéressons à la notion de familiarisation et quels étaient les objectifs de cette étude.

PARTIE 1 (article HFES)

1 La notion de familiarisation

Aujourd'hui, les entreprises avec lesquelles nous travaillons sont assez démunies sur la démarche à adopter pour bien intégrer les exosquelettes. En tant qu'intégrateur depuis 2017, nous avons pu constater auprès de nos premiers partenaires que le rejet ou la difficulté à apprécier l'exosquelette pouvait dépendre de sa familiarisation, notamment : de la manière dont avait été formé l'opérateur, du temps dont il avait disposé ou du type d'entraînement par exemple. Cette phase de familiarisation nous semble aussi indispensable d'un point de vue sécuritaire, afin que l'opérateur comprenne les risques et les limites du système pour sa propre sécurité. Hélas, des partenaires nous ont communiqué que cette étape de familiarisation est trop souvent écourtée, voir absente. C'est pourquoi nous avons souhaité proposer dans notre protocole d'intégration global une certification à l'utilisation qui n'est délivrée que si l'opérateur obtient un certain niveau de familiarisation à l'exosquelette (niveau 4 sur l'échelle HEFL) qui inclus de savoir l'installer et l'utiliser en toute sécurité. Un protocole de familiarisation interne (tutoriel 'expert') est conçu pour que les futurs utilisateurs atteignent ce niveau facilement et rapidement avec des connaissances et une pratique spécifique à leur activité.

2 Objectifs de l'étude en laboratoire

L'étude terrain comporte deux objectifs principaux : l'étude des effets du port de l'exosquelette et des supports de familiarisation sur la performance objective, les bénéfices perçus et un score d'acceptation. Par rapport à l'étude précédente, nous devons clarifier que dans les deux études suivantes, la notion d'acceptation est interrogée de manière globale à travers le questionnaire, mais également à travers un 'score d'acceptation' qui comprend trois dimensions : la satisfaction globale, la volonté d'utiliser au quotidien, la recommandation à un collègue/ami. Ce score permet de quantifier la perception des participants sur leur expérience et aussi leur projection dans l'utilisation future.

Notre principal objectif était de pouvoir étudier les effets des variables étudiées directement sur le terrain. Mais les aléas de la production, les contraintes d'équipements des participants pouvant gêner l'activité, et le risque de perturber l'activité de l'entreprise, nous ont poussé à

également mettre en place un protocole en laboratoire pour simuler les contraintes industrielles plus facilement, avec un plus grand nombre de participants possible. Un des objectifs était également de concevoir un protocole de test très simple à réaliser, facilement reproductible chez n'importe quel partenaire. Nous utilisons des méthodes de mesures simples, mobiles et accessibles pour anticiper leur utilisation sur le terrain par la suite. Le protocole de test en laboratoire a été également conçu à travers plusieurs phases d'essais pour être assez sollicitant mais pas trop fatiguant pour les participants. Les tâches doivent pouvoir être réalisées facilement après quelques minutes d'entraînement. Enfin, à la différence des possibilités du terrain, nous avons pu obtenir une plus grande diversité de participants avec trois catégories d'âge (20-30, 30-40, 40+) et un échantillon total équilibré en genre (50% de femmes). Cette étude a été publiée dans : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomic Society Europe Chapter 2019*.

Investigating the effects of passive exoskeletons and familiarization protocols on arms-elevated tasks

Aurélie Moyon, ^{a,b*}, Jean-François Petiot^a, Emilie Poirson^a,

^aEcole Centrale de Nantes, LS2N (UMR CNRS 6004), 1 rue de la Noë, 44321 Nantes Cedex 3, France ^bEurope Technologies, 2 rue de la fonderie, 44470 Carquefou.

Abstract

Exoskeletons present interesting qualities for high demanding physical tasks, but their integration in companies is still a challenge. This study aims to evaluate the effects of exoskeletons on the completion of arm-elevated tasks. Three categories of dependent variables are studied in a lab experiment: physical measurements (cardiac cost), performance indexes (quality and duration) and perceived benefits (reported by subjects on quantitative scales). The independent variables of the experiment are the presence (or not) of the exoskeleton, and the media used for the familiarization process of the subject before the use of the exoskeleton. Two levels of familiarization are proposed to the subjects: brochure of the exoskeleton manufacturer, and live tutorial demonstration by a skilled experimenter. A laboratory study (n=36 participants) involving two arms elevated tasks was specifically designed to simulate industrial work situations. Results show that the use of the exoskeleton reduces cardiac cost, global and local perceived effort, number of errors, and increases task performance. Concerning the familiarization process, the live tutorial demo provides higher task performances and acceptance, lower global and local perceived effort and the number of errors. These results confirm that user acceptance and integration of exoskeletons in companies require dedicated training supports.

3 Introduction

Passive exoskeletons started to enter the market of New Assistive Technologies (NAT) in various industries where handling tasks are still involving human control and know-how. This growing interest forces companies to relate the claimed effectiveness of occupational exoskeletons as a solution that could release muscle activity and task-related strain. Even if

functional effects have been established in reducing muscular demand (Huysamen et al., 2018 ; Theurel & Desbrosses, 2019) these exoskeletons are still facing ergonomics barriers such as discomfort (de Looze et al., 2016), movement limitations, low usability and acceptance of end users. (Graham et al., 2009). This is why previous studies suggest a more holistic approach (Bosch et al., 2016) to investigate dimensions of usability, moreover on realistic work settings (Baltrusch et al., 2018). Recent studies suggest focusing on the actual use, to better understand expected and unexpected potential effects (Kim et al., 2018). This is why the evaluation of Human Exoskeleton Interaction (HEI) should focus on Usability. Last years, Europe Technologies has been training future users and product managers to the use of the exoskeleton, in order to enhance potential adoption. However, no evidence has been found on the effectiveness of a specific familiarization protocol on user acceptance and on task-related performance. Consequently, the main purpose of the current study is to validate the claimed positive effects of the exoskeleton prototype, as well as the effectiveness of a familiarization protocol on objective performance, perceived benefits and user acceptance. A second aim is to highlight specifications of human-exoskeleton interaction to guide further product development and familiarization program. The remainder of the paper is organized as follows. The second section presents the material and method and the description of the experiment. Results are presented in the third section. The concluding section provides implications and perspectives for further work.

4 Materials and methods

4.1 Participants and ethics approval

36 healthy participants (50% male, 50% female) with no current injuries / musculoskeletal disorders volunteered and gave written consent before the experiment according to the tenets of the Declaration of Helsinki. Current health status was evaluated using the Nordic questionnaire (Descatha et al., 2007). Their age span from 20 to 65 years old with a range of height between 163 to 175cm. Participants had never been trained to use exoskeleton nor performing tasks.

4.2 Occupational exoskeleton

The exoskeleton used is a wearable passive system provided by our partner *SkelEx* (SkelEx, Rotterdam, Netherlands). It was co-developed with this partner from various field studies and users' feedback (Moyon et al., 2018). As shown in Figure 38, its design is based on a backpack style with two flat springs in the back which can store kinetic energy when lowering the arms. Reversely, the spring strength is then applied upwards and help reducing upper body strain while performing arm-elevated tasks. This constitutes the first independent variable of our experiment with the two conditions (Exo/No Exo). Two versions of the prototype called Exo A and Exo B have been tested for a secondary design purpose, so results won't be discussed here. All variables were tested for both versions and results are merged into an Exo condition.

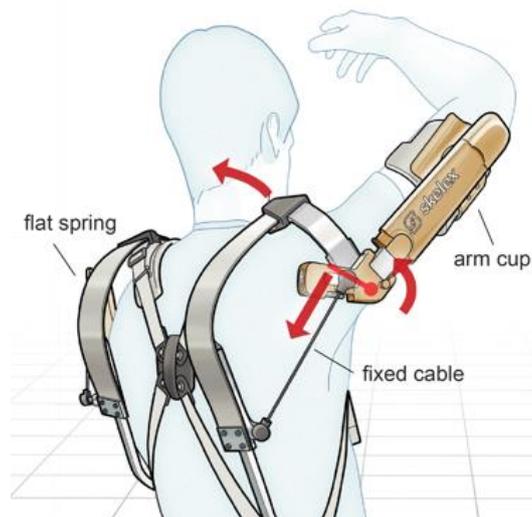


Figure 38. Product architecture and the mechanical principle of operation of the tested exoskeleton. Flat springs in the back apply a progressive strength upward.

4.3 Familiarization protocols and supports

In our observations of the spreading to exoskeletons in industry, we noticed that companies are starting to buy exoskeletons without considering the familiarization phase and potential fail of acceptance for occupational use. In order to protect future users, the French Institute of normalization is working on an agreement and a potential future norm about Human-Exoskeleton Interaction ergonomics. Europe Technologies takes actively part in this project, by sharing field insights. A global acceptance program has been designed to foster better integration of exoskeletons in companies. A key element of this program is a familiarization

protocol (labeled F2), designed to optimize users' performance and acceptance. It is based on our previous expertise to give users the best level of knowledge and practice in the shortest amount of time (to match real-time constraints). To do so, this protocol F2 is composed of the following steps: Demystification, Technics, Potential & Limits, Donning/Adjusting/doffing, free experience (without industrial constraints) and training scenarios. It aimed at providing certification of a level 4 based on a 1-7 scale of knowledge/practice (Chap.2, section 2.2.2

Évaluation de la maturité). Level 4 means that participants are aware of basic technical, safety and usability principles, and know how to don/doff the exoskeleton quickly. In the following experiment, F2 is performed by a skilled experimenter and materialized by a written script. Another familiarization protocol, F1, corresponds simply to the manufacturer's brochure, materialized by a paper brochure. The two familiarization protocols (F1 or F2) were administered to the participants before the execution of the task. Equal duration was given to participants for both protocols and a training before the first test. This constitutes the second independent variable of our experiment. Between tasks, participants could adjust the exoskeleton again if needed. They could read the brochure F1 or ask the experimenter to repeat an item in tutorial F2. But the experimenter couldn't take any additional initiative, not to distort the results.

4.4 Testing equipment

The heart rate was measured in real time during the tasks. We used a heart rate computer (RS800CX, Polar Electro, Kimpele, Finland) and its dedicated professional software (Polar Trainer 5, Polar Electro, Kimpele, Finland). This system is composed of an emitter attachable on a thoracic belt. The data transfer was realized from the emitter to the software by an infrared USB adapter. For precision task performance, user lines were obtained by an interactive whiteboard SMART Board 800. This system projects and records automatically produced pixels. 1 pixel = 1mm. All tasks were camera recorded to help further interpretation of results.

4.5 Design of experiments

For a secondary product design purpose, all participants tested two versions of the exoskeleton prototype called A and B, so as the NoExo condition. Concerning the familiarization protocol, given that protocol F2 is more informative than F1, it was irrelevant for the same participant to test protocol F1 after F2. For this reason, the only possible orders for the test were F1->F1, F1->F2 or F2->F2. To limit the number of experiments (two tests with two exoskeletons A and B), a

balanced incomplete block design was defined, presented in Table 8. Six blocks were considered, with six participants in each block.

Table 8. Experimental design for the two variables Exoskeleton and Familiarization protocol with two conditions (NoExo/Exo) and (F1/F2). The rows correspond to the first combination tested by the participants, the column to the second (for example, 6 participants tested first ExoB with protocol F1 (BF1), then ExoA with protocol F1 (AF1)).

	AF1	AF2	BF1	BF2
AF1			6	6
AF2				6
BF1	6	6		
BF2		6		

4.6 Previous analysis of industrial tasks

Assembling tasks involve arm-elevated postures that could be assisted by an exoskeleton. The manufacturer *Ske/Ex* provided the model that was designed specifically to assist the strain related to this posture. Constraints of the real work situation such as average duration of steps, the weight of the tool, precision standards have been integrated into the lab experiments. Experiments took place between January and May 2019 on the site of LS2N laboratory, Nantes.

4.7 Lab tests

From an analysis of the previous industrial tasks, a controlled laboratory experiment was built in order to not disturb the manufacturing process of the industrial. These tasks in a laboratory have, furthermore, the following advantages:

- To measure more easily the effects of the exoskeleton and the familiarization protocol on user performance, perceived benefits, and acceptance score with a easily reproducible procedure.
- To involve more participants, with a larger diversity of profiles

The idea was to create a simple laboratory protocol that could easily evaluate the potential of exoskeletons for repetitive and precision tasks.

4.7.1 Repetitive task (R):

According to real constraints observed previously, a repetitive task was designed to reproduce arm-elevated posture (Figure 39). A board with eight lines of industrial nuts was placed vertically on the wall. The size and height of the board were adjusted so that any participants could reach at least 7/8 lines with a tool of 6 kg. Setting movements were paced at 20 actions/min using a metronome. Participants had to set as many nuts as they can. They stopped when they experienced fatigue or high discomfort or failed pace three times in total. Errors were observed: nuts should be correctly set; we tolerate a space of 5 millimeters corresponding to nut thickness. Data collected were: total time, time per line, number of nuts correctly set, number of errors.

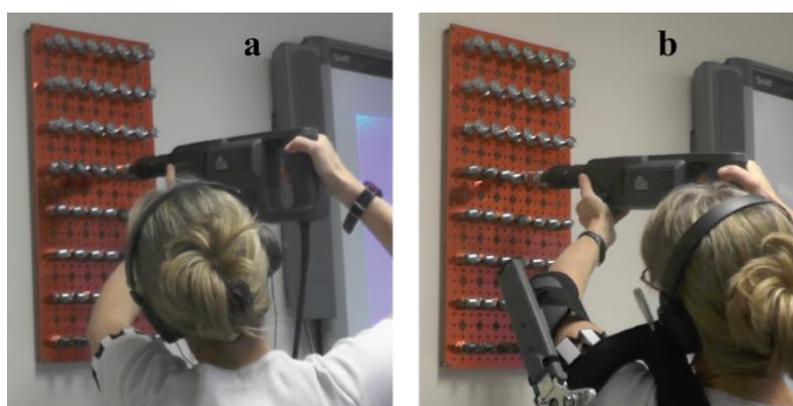


Figure 39. (a) A participant without the exoskeleton performing the repetitive task R and with the exoskeleton (b).

4.7.2 Precision task (P):

This task aimed at testing the potential benefits of wearing the exoskeleton (less perceived effort and fatigue, respect of quality and natural moves) while performing repetitive and accurate movements, as observed in the real work situation. A background of lines was projected on the wall by an interactive whiteboard system (Figure 40). The test consisted of redrawing the same signs with an interactive pen with maximum accuracy. Seven lines of ten signs each are displayed on the background. Participants started by the line at their eye-level and moved progressively upward to an overhead position. They had to stand behind a line placed at 40cm from the wall but could move parallel to the wall. Distance from the wall was

visually controlled so that arms elevated posture targeted by assistance would be respected. The test ended when participants experienced fatigue, discomfort or traced all signs. Movements were paced at 4 second/sign using a voice recorded metronome. Data collected were: traced signs, time per line, number of completed signs, and number of errors/line.

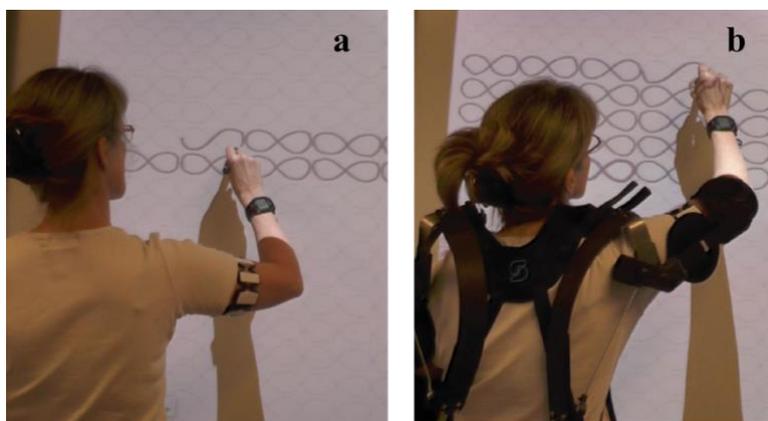


Figure 40. (c) A participant performing the precision task P without exoskeleton (a) and with the exoskeleton (b). Thickness of the pen was set up at 2.5mm (2.5 pixels).

4.8 Objective measurements

4.8.1 Familiarization performance of donning/adjusting

Familiarization performance was measured using a chronometer for doffing/adjusting procedure after the participant had been taught about the exoskeleton using either the brochure or a tutorial (F1, F2). Measurements were organized as follows:

- 5 minutes for the participant to read the manufacturer's brochure or to listen to the tutorial performed by a qualified instructor;
- 3 minutes for the participant to then individually test the exoskeleton;
- 3 minutes for the participant don the exoskeleton and adjust it.

4.8.2 Global physical workload

This work situation has been previously targeted by an internal ergonomic study. Laboratory tasks were designed to approach real perceived effort with similar postures and duration constraints. The condition Exo/NoExo was measured on both tasks R and P, always in the same order and separated by a break while they seated. A reference heartbeat (Hr) was recorded while seating 5min before performing the task. Activity blocks were analysed with the

conditions Exo/NoExo. The measurements were separated by a 10 minutes break while operators remained seated. According to Meunier protocol (Meunier, 2014), in order to compare two different conditions of the activity (NoExo, Exo), we calculated the Absolute Cardiac Cost (ACC) according to the duration of the activity. ACC is the difference between the average heart rate (H_a) and the Reference Heart rate (H_r) and it is expressed in beat per minute (bpm). $ACC \cdot duration$ is expressed as the heart rate (acceptable) according to the duration of the task (in minutes), which means: $ACC \cdot d = (H_a - H_r) \cdot d$. It represents the number of pulses 'consumed' during the task. The definition of the Absolute Cardiac Cost is represented in Figure 41.

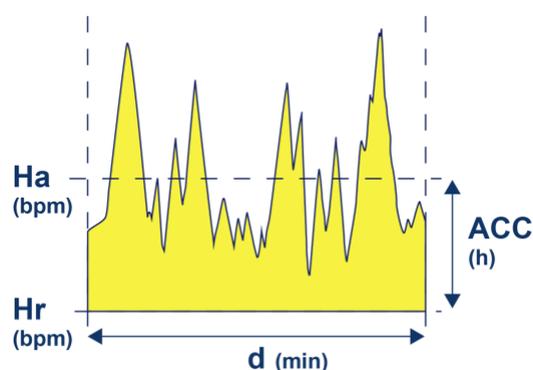


Figure 41. $ACC \cdot duration$ is the difference between Reference Heart rate (H_r) and average heart rate (H_a), expressed in beats per minute multiplied by task duration (min).

4.8.3 Tasks performance

We measured the task performance based on two factors: the number of errors made by the participant and the duration of the task. On the repetitive task R, the number of completed settings was observed and the duration of task recorded using a chronometer. Errors were observed for uncompleted settings with a tolerance of 5mm. taken into account A speaker connected to a digital metronome indicated the rhythm to respect. The performance of precision task P was measured using a chronometer and counting the numbers of completed symbols. Errors were observed for uncompleted signs with a tolerance of 5mm.

4.9 Subjective measurements

A four dimensions questionnaire (Cognitive, Occupational, Physical and Affective) built from a previous study (Moyon et al. 2019) recorded user's subjective effects of exoskeleton on tasks. The perceived musculoskeletal strain was evaluated with Borg Scale (CR-10) (Borg, 1970). We

recorded on Likert scales (0-10) factors such as Easiness of learning, Evolution of perceived musculoskeletal effort, Perceived Usability for industrial constraints, Physical Comfort, Intention to use daily and Acceptance after use.

5 Data Analysis

To investigate significant differences in user performance, perceived benefits and acceptance score between the Exoskeleton conditions, differences in means were analysed by comparisons of NoExo (without exoskeleton)/Exo (with exoskeleton) using an ANOVA (mixed linear model, which considers the subject as a random effect and the factor "Exoskeleton" as a fixed effect) and a one-tail one-sample T-test was applied to determine a significative threshold for Exo condition subjective results according to the variables. Also, the effectiveness of the familiarization protocol (F1/F2 conditions), was analysed for the same variables and for Exo condition only, by a two-samples two-sided T-test, which calculates the difference of means between the six groups (. The statistical significance was set to $p < 0.05$ (*) and $p < 0.001$ (**). Statistical analyses were performed using XLSTAT 2019 (Addinsoft, Paris, France). For each dependent variable, the results for the different conditions are reported as means (with their standard errors) in original units.

6 Results

6.1 Study of exoskeleton effects on global physical workload

The evaluation of Absolute Cardiac Cost (ACC) with task duration (ACC*d) is expressed in a number of heart rate (acceptable). The results are shown in Figure 42.

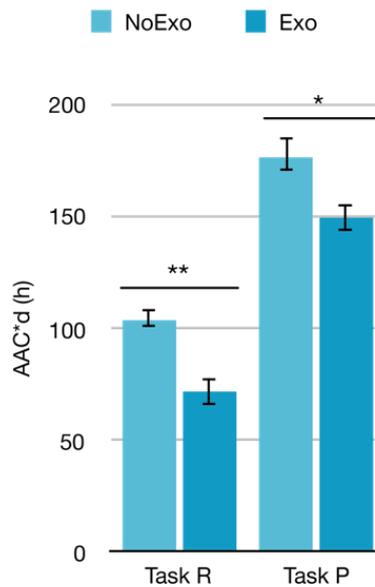


Figure 42. Evaluation of ACC*d (acceptable) for Task R and task P with (Exo) and without (NoExo) exoskeleton. Errors bars indicate standard deviation and brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (* $p < .05$, ** $p < 0.001$).

For both tasks, the lowest ACC*d values were found while wearing the exoskeleton (Exo). Without the exoskeleton (NoExo), ACC*d is increased by 32 acceptable ± 2.9 for the task R and by 27.1 acceptable ± 5.9 for the task P. Despite the weight and physical constraints produced by springs, the exoskeleton seems to reduce the cardiac cost for all tasks.

6.2 Study of exoskeleton effects on tasks performance

Hypothesis: performance is better when the participant is wearing the exoskeleton. For task R, we observed the highest number of valid actions (45.5 ± 1 , $p < 0.0001$) and the lowest number of errors (4.4 ± 0.3 , $p < 0.0001$) is found when wearing the exoskeleton. A similar effect is found for task P: the highest number of valid signs (49.6 ± 0.9 , $p < 0.0001$) and the lowest number of errors (5.1 ± 0.3 , $p < 0.0001$) were found when wearing the exoskeleton. We conclude that for all tasks, Human-Exoskeleton performance is better than NoExo condition with a higher number of actions and a lower number of errors.

6.3 Subjective measures

a) Physical aspects: evolution of perceived musculoskeletal strain

Questions:

'With the exoskeleton, my perceived global strain is' (nonexistent-unbearable)

'With the exoskeleton, my perceived local strain (for various body parts) is' (nonexistent-unbearable)

Hypothesis: perceived strain could be reduced while wearing the exoskeleton. Global strain for tasks R and P has been evaluated respectively with a mean of 6.99/10 \pm 0.21 and 6.45/10 \pm 0.25 for NoExo condition and 4.22/10 \pm 0.14 and 3.61/10 \pm 1.16 for Exo condition. These results are represented by dotted lines in Figure 45. The results indicate that participant's global strain was lower when wearing the exoskeleton, with a statistically significant ($p < 0.0001$) reduction of global strain respectively of 3.06/10 and 3.12/10 for task R and P. Perceived local strain shows lower scores when wearing the exoskeleton and an effect of transfer toward other parts of the body has shown in Figure 43 (results merged for both tasks). Indeed, participants perceived a mean reduction of strain on upper parts of the body, on Shoulders (2.32/10; \pm 0.15, $p < 0.0001$), on Arms (2.93/10 \pm 0.12, $p < 0.0001$), Elbow/forearms (0.06/10 \pm 0.16, $p < 0.0001$), Neck (1.41/10 \pm 0.14, $p < 0.0001$), in the upper and lower back (0.79/10 \pm 0.09, $p < 0.0001$ and 0.46/10 \pm 0.1, $p < 0.0001$) and on Legs (0.17 \pm 0.06, $p < 0.0001$). Also, the perceived strain has been transferred to other parts of the body, with a small mean increased of 0.4 \pm 0.16, $p = 0.002$ in the Elbow/Forearm part.

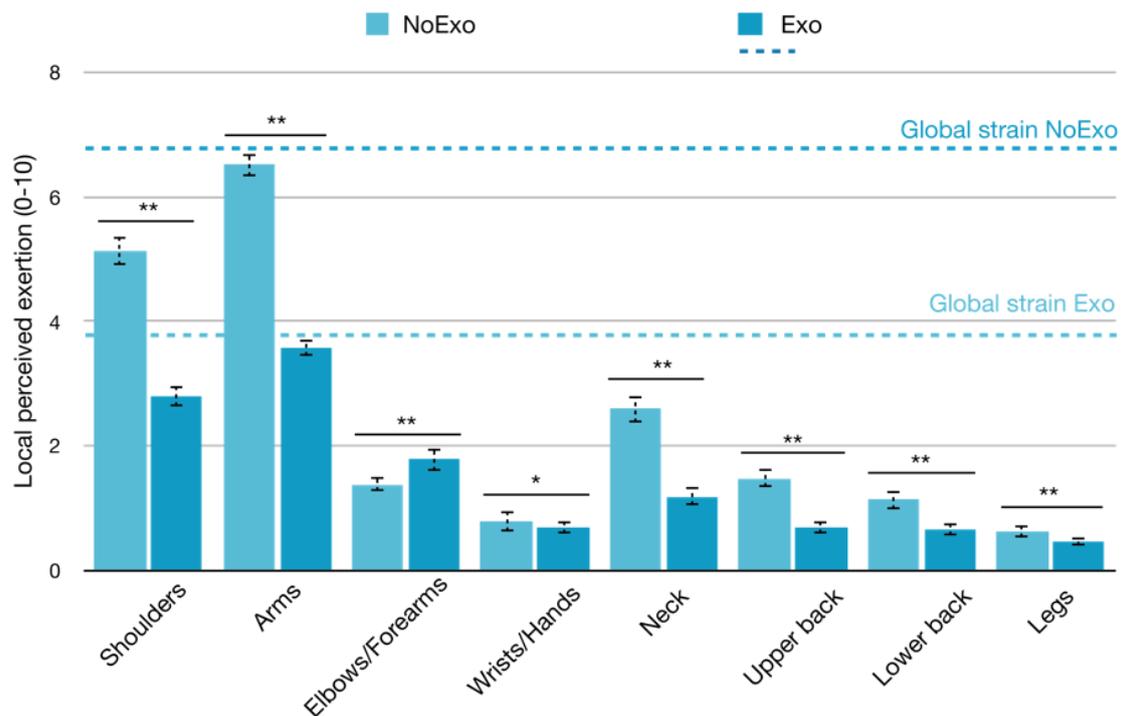


Figure 43. Evaluation of global and local perceived effort for specific parts of the body without (NoExo) and with Exoskeleton (Exo) for all tasks. Dotted lines indicate global strain means. Errors bars indicate standard deviation and brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference ($*p < .05$, $**p < 0.001$).

We can conclude that the evolution of perceived strain could be reduced globally while wearing the exoskeleton (Exo). However, we observed a transfer effect of local strains with a very small local decrease on Wrist/Hand and a non-expected increase on Elbow/Forearm.

b) Cognitive and Occupational aspects

Regarding Affective aspects, no participant found that wearing the device was devalorizing. To check if the exoskeleton is suitable to perform simulated tasks constraints, we observed the evolution of extra focus demand, perceived quality and effectiveness while wearing the exoskeleton. Between task R and P, differences in means were not significant ($p > .05$), means for both tasks are merged.

Questions:

With the exoskeleton, I can perform the task with the same quality (strongly agree–strongly disagree)

With the exoskeleton, I feel (much less effective–much more effective)

Two reverse questions: '*Using the exoskeleton requires extra focus demand*' (*strongly agree–strongly disagree*), '*Mastering the use of the exoskeleton involves effort*' (*not important at all–extremely important*).

For all results except the last two inverse sentences (Effort to master and Extra focus demand), results <5 are interpreted as a negative effect and results >6 are interpreted as a positive effect. A score between 5 and 6 corresponds to indecision or average effect. The effort to master and Extra focus demand, results <5 are interpreted as a positive average effect and results >4 are interpreted as a positive effect of the exoskeleton. A one-tail one-sample T-test was applied to determine a significative threshold according to the variable. For both tasks in average regarding Cognitive aspects, perceived effectiveness was positively significant with the exoskeleton (mean = 7.19, lower mark interval: 6.88, $p < 0.0001$), participants reported that wearing the exoskeleton didn't require important extra focus demand (mean = 4.21, upper mark interval: 4.64, $p = 0.001$) or require an important effort to master (mean=4.07, upper mark interval: 4.39, $p = 0.0001$). Also, they could perform the same quality standards (mean=7.17, lower mark interval: 6.84, $p < 0.0001$). We can conclude than the use of the exoskeleton on the simulated industrial tasks does not disturb the respect of quality standards, perceived performance and doesn't imply extra mental load concerning focus demand.

6.4 Effects of familiarization protocol (F1/F2)

6.4.1 Objective measurements

a) Donning performance

Hypothesis: shortest donning duration performed with F2 protocol. The Figure 46 displays participants' exoskeleton donning performance, based on the familiarization protocol (F1 and F2). Depending on the maximum duration allowed by the industrial partner, records might have been limited to 180 seconds. We observed a significant decrease of donning performance (adjustments included) with the shortest duration of 93.97 ± 26.47 s for F2 vs 171.97 ± 26.36 s for F1 as shown in the Figure 45. Donning performance is expressed in seconds, the dotted line represents the maximum duration users have to reach to pass level 4 of familiarization on our internal scale (HEFL: Human Exoskeleton Familiarization levels). Otherwise, user certification is not delivered.

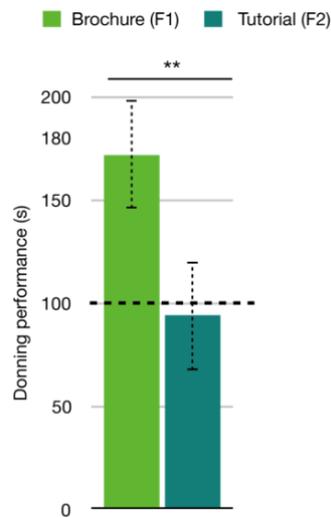


Figure 45. Evaluation of donning/adjusting performance (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).

The results show that the F2 protocol has a positive effect on donning/adjusting performance with an average duration close to the target level of 100 seconds. Familiarization using the manufacturer's brochure (F1) is much less efficient and not enough to reach the certification level (100 seconds). All the participants excepted tree reached the maximum limit of 180 seconds.

b) Global physical workload

Hypothesis: the protocol F2 allows to have a lower physical strain by optimizing installation, adjustment, and use. If experiencing F2, ACC*d is reduced by 64.28 acceptable ± 80.3 for the task P with $p=0.008$. The decrease for task R is not significant, as shown in Figure 46.

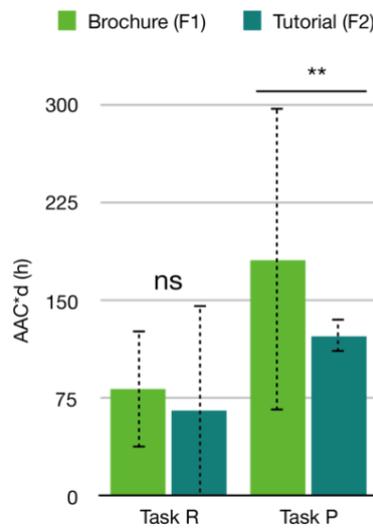


Figure 46. Evolution of mean CCA*d (acceptable) for Task R and task P according to familiarization protocol (F1 or F2).

Concerning the task P, we found the lowest ACC*d values for the participants who learned how to use the exoskeleton with the F2 protocol. We can conclude that F2 had a positive effect on users' global physical workload for the task P.

d) Effectiveness on task performance

Hypothesis: Performance is better when a participant has been familiarized with expert tutorial (F2). The evolution of the number of actions and error for the repetitive task R with familiarization protocol (F1 or F2) is shown in Figure 47. The highest number of valid actions (49.22 ± 7.62 , $p < 0.0001$) and the lowest number of errors (3.52 ± 1.61 , $p < 0.0001$) were found when experiencing the expert tutorial F2.

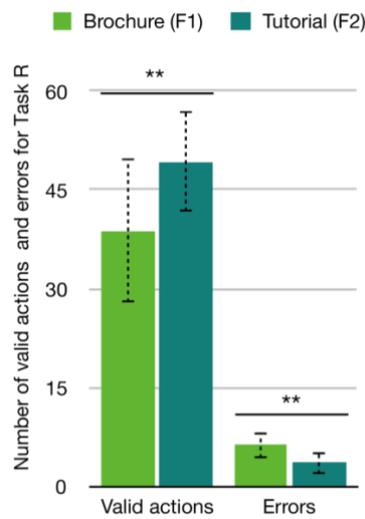


Figure 47. Number of valid actions and errors committed for repetitive task R according to familiarization protocol (F1 or F2). Brackets indicate significant differences between F1 (manufacturer's brochure) and F2 (expert tutorial) condition.

Results for the precision task P with familiarization protocol (F1 or F2) are shown in Figure 48. The highest number of valid signs (52.92 ± 7.93 , $p < 0.0001$) and the lowest average number of errors (3.81 ± 2.55 , $p < 0.0001$) were found when wearing the exoskeleton.

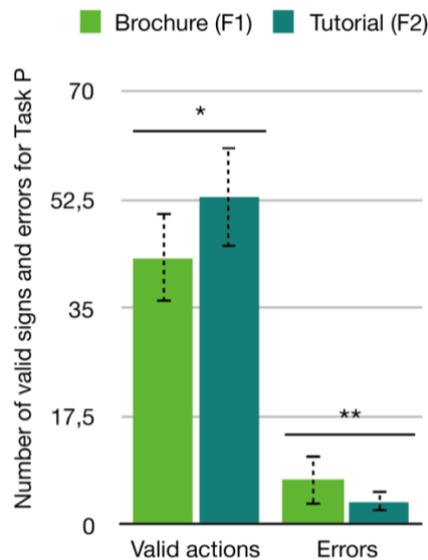


Figure 48. Number of valid signs and errors committed for precision task P according to familiarization protocol (F1 or F2).

We conclude that for all tasks, F2 has given a better Human-Exoskeleton performance than manufacturer's brochure F1 with a higher number of actions and a lower number of errors.

6.4.2 Perceptive results

a) Physical, Cognitive and Occupational aspects

Hypothesis: F1 protocol produces lower perceived benefits, usability and acceptance score than F2 protocol. The effectiveness of familiarization protocol (F1/F2) on user perception is verified by two-samples two-sided T-test to compare the means of these two groups. The results are presented in the Table 9. Higher scores given on Likert scale (0-10) have been found when participants experienced F2 familiarization protocol. The most significant differences were found in this order for easiness of learning (donning and adjusting) with an increased score of +3.79/10, comfort (+3.36/10), easiness of movement (+2.95/10), focus demand (+2.64/10). They are shown in bold in Table 9 with all variables.

Questions (Likert scale 0-10):

'To learn how to don and adjust the exoskeleton is easy' (strongly agree–strongly disagree)

'To master the exoskeleton is easy' (strongly agree–strongly disagree)

'The support the exoskeleton provides when performing the tasks is' (not important at all–extremely important)

'Learning to move with the exoskeleton is easy (strongly agree–strongly disagree)

'The exoskeleton is comfortable' (extremely uncomfortable- extremely comfortable)

'Using the exoskeleton requires extra focus demand' (strongly agree–strongly disagree)

'When using the exoskeleton, I feel' (much less effective-much more effective)

'I can perform my task at the same quality when using the exoskeleton' (strongly agree–strongly disagree)

b) Global acceptance score

Hypothesis: the user's acceptance score is higher when experiencing F2. Acceptance is scored through a three-dimensional question: Q1: 'My global satisfaction for the exoskeleton is (extremely low- extremely high), Q2: 'If needed, I would use the exoskeleton (Never-Every day), Q3: I would recommend the exoskeleton to a colleague (Not at all- absolutely). The validity of three questions toward a global Acceptance dimension is verified by alpha's Cronbach >0.80.

Table 9. Descriptive statistics (mean, standard deviation, difference, p-value) and comparison of familiarization protocol (F1 or F2) on perceived benefits and acceptance dimensions (*p < .05).

Dimension	Brochure (F1)	Tutorial (F2)	Difference, p value
Easiness of learning (donning/adjusting)	4.38 (2.80)	8.18 (1.25)	3.79, <0.0001
Perceived support	6.05 (2.22)	7.29 (2.02)	1.24, 0.001
Master demand	5.11 (2.33)	3.02 (1.92)	2.09, <0.0001
Perceived global strain	5.29 (1.57)	3.81 (1.37)	1.48, <0.0001
Easiness to use	5.81(2.28)	7.86(2.15)	2.05, <0.0001
Easiness of movement	4.91 (2.62)	7.86 (1.91)	2.95, <0.0001
Comfort	4.52 (2.62)	7.88 (1.91)	3.36, <0.0001
Focus demand	5.52 (3.03)	2.88 (2.67)	2.64, <0.0001
Effectiveness	6.28 (2.31)	8.11 (1.77)	1.83, <0.0001
Respect of quality	6.34 (2.52)	8.00 (1.86)	1.66, <0.0001
Acceptance score	6.42 (1.99)	8.25 (1.70)	1.83, <0.0001

We conclude that for all aspects presented (Cognitive, Occupational and Physical), operators reported with F2 protocol a better perceived effectiveness, benefits and user acceptance than with F1 protocol (manufacturer's brochure). Human-Exoskeleton performance could be significantly influenced by the familiarization experience that includes different types of knowledge and practice.

7 Discussion and Conclusion

Firstly, some interesting contributions to Human-Exoskeleton Interaction on simulated industrial tasks have been found. Significant positive effects have shown a reduction in Global physical workload and perceived strain, an increase in task performance, in relation to positive effects on subjective benefits as perceived performance, the respect of quality standards and the lack of extra focus demand. These positive effects on physical, cognitive and occupational aspects

are strategic to ensure occupational exoskeleton adoption in industries. Also, if the expected reduction of perceived strain is significant in targeted muscles (shoulder, arms), some muscular strain increased while wearing exoskeleton and highlights the possible influence of load transfer that should be investigated. A further study could aim at simulating muscle activation of the Human-Exoskeleton system to better understand this effect. Secondly, a key finding of this study is a significant positive effect of an expert familiarization protocol on perceived benefits, usability and user acceptance. These results suggest that the use of the exoskeleton is not intuitive. A familiarization experience that includes specific knowledge and practice could help optimize Human-Exoskeleton performance and user acceptance, which could eventually lead to a quicker adoption in companies. It is not easy to study the familiarization process as it is related to time. And long experiments would not be appropriated as they would involve participants to endure high strains. The suggested laboratory protocol is easily repeatable and allows the test of familiarization dimensions using a short duration of physio pathogenic activity. Further analysis could deal with the influence of the acceptance score on other variables. As well as the effect of panel diversity that has not been taking into account in this study. Also, differences of effects of the variables could be investigated using Exo A and B to bring manufacturer interesting feedback on the effect of claimed improvements between prototypes.

8 References

- Baltrusch, S.J., van Dieën, J.W., van Bennekom, C.A.M., & Houdijk, W. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.007>.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.12.003>.
- Borg, G. (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2, 92-98.
- de Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S., & O'Sullivan, L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59, 671-681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>.

- Descatha, A., Roquelaure, W., Chastang, J.-F., Evanoff, B., Melchior, M., Mariot, C., Ha, C., Imbernon, E., Goldberg, M., & Leclerc, A. (2007). Validity of Nordic-style questionnaires in the surveillance of upper-limb work-related musculoskeletal disorders. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 33, 58-65.
- Graham, R.B., Agnew, M.J., & Stevenson, J.M. (2009). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task : Assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40, 936-942. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.01.006>.
- Hill, S.G., Iavecchia, W.P., Byers, J.C., Bittner, A.C., Zaklade, A.L., & Christ, R.E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 34, 429-439. <https://doi.org/10.1177/001872089203400405>.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K.S., Graf, E., & O'Sullivan, L.W. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*, 70, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>.
- Kim, S., Nussbaum, M.A., Mokhlespour Esfahani, M.I., Alemi, M.M., Alabdulkarim, S., & Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation : Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*, 70, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.025>.
- Meunier, P. (2014). *Cardiofréquencemétrie pratique en milieu de travail : Une approche objective de la pénibilité professionnelle*. Éd. Docis.
- Moyon, A., Petiot, J.-F., & Poirson, E. (2019). Development of an Acceptance Model for Occupational Exoskeletons and Application for a Passive Upper Limb Device. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7:3-4, 291-301, <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1662516>.
- Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F. (2018). *Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations*. *Procedia CIRP, ELSEVIER*, 2018, 70 (pp. 284-289). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.028>.
- SkelEx (Rotterdam, Netherland.). Site consulté 30 mai 2019, à l'adresse <https://acceptable.skelex.com/>.

Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational Exoskeletons: Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1638331>.

PARTIE 2 (article AE)

1 Étude expérimentale en situation réelle

1.1 Objectifs de l'étude

L'étude en laboratoire a révélé des effets significatifs positifs du port de l'exosquelette cependant malgré notre attention à simuler l'expérience d'usage du cas d'usage industriel, une situation contrôlée n'était pas suffisante notamment pour la crédibilité auprès de nos partenaires et l'implication partielle des participants, qui ne peuvent pas se projeter dans l'utilisation quotidienne d'un tel système comme de vrais opérateurs. Il nous a donc paru indispensable d'étudier ces effets en situation réelle pour confirmer les résultats obtenus en laboratoire. Nous allons présenter l'étude terrain réalisée en parallèle sur le site d'Airbus, à Nantes entre janvier et septembre 2019. L'objectif de cette étude était d'étudier les effets de la version la plus récente de l'exosquelette (Exo B) ainsi que du protocole de familiarisation sur la pénibilité physique globale, la performance de l'opérateur, les bénéfices perçus et le score d'acceptation sur la situation de travail réelle. L'objectif secondaire de cette étude était d'amorcer le projet d'intégration d'un exosquelette sur ce terrain et de déterminer les méthodes d'évaluation à mettre en place pour le suivi individuel ainsi que les modifications éventuelles de la situation de travail. Cette étude sera présentée sous forme d'un article, soumis en [mai 2020](#) à la revue *Applied Ergonomics*. Nous concluons ce chapitre par la discussion des apprentissages et limites de l'utilisation de l'exosquelette sur cette situation de travail.

1.2 Constitution du groupe projet n°2

La validation des méthodes de mesures et l'organisation des tests sont réalisées de manière participative avec un groupe projet pluridisciplinaire comme pour le premier cas d'usage. Ce groupe s'est réuni plusieurs fois (totalement ou partiellement) entre octobre 2018 et octobre 2019. Il est constitué de deux chefs d'atelier, un ergonome, un infirmier, ainsi qu'une vingtaine d'opérateurs volontaires. Le rôle de ce groupe est d'identifier les postes concernés par les postures 'bras levés', de trouver les opérateurs volontaires et de prévenir de leur disponibilité.

A la suite des résultats, il sera consulté pour formaliser un protocole d'intégration propre à leur organisation. Chaque opérateur a signé un consentement pour leur participation aux tests.

Effects of a passive exoskeleton and its learning instructions on a real industrial task.

Aurélie Moyon^{a,b}, Jean-François Petiot^a, Emilie Poirson^a,

^aEcole Centrale de Nantes, LS2N (UMR CNRS 6004), 1 rue de la Noë, 44321 NANTES Cedex 3, France ^bEurope Technologies, 2 rue de la fonderie, 44470 Carquefou.

Abstract

In industry, there is a growing interest in occupational exoskeletons as a potential solution to reduce pain at work. However, adoption of this technology remains a considerable challenge because of the lack of knowledge of the effects on users and their work, and on acceptance factors amongst workers. This field study aims to evaluate the claimed effects of an upper body passive exoskeleton on the completion of arm-elevated tasks in a real situation. A second goal of the study is to evaluate the efficacy of in-house tutorials versus brochures in regards to user performance, perceived benefits, and acceptance centered around usability. A field study (n=16 participants) involving arms-elevated tasks was set up in an industrial workshop without disturbing the usual process. Participants in the study were sorted into categories, depending on whether they used or did not use an exoskeleton, and which type of familiarization media (brochure or expert tutorial) was used to explain the operation and functions of the exoskeleton to the participant. The study utilizes four categories of dependent variables: donning performance (duration), physical measurements (cardiac cost), performance (number of errors), and perceived benefits including an acceptance score (likelihood to recommend, global satisfaction, willingness to use) reported on quantitative scales. The results show that the use of an occupational exoskeleton reduces global physical workload, global and local perceived effort, the number of errors, and increases perceived performance and quality. With respect to familiarization media, the results demonstrate that a live tutorial with an expert provides higher physical support, greater task performance, and increased user acceptance and perceived benefits than familiarization using a brochure. These results confirm the claimed effects of the device and raise questions about potentially unexpected physical load transfer. In addition, with

regard to the familiarization process, companies could benefit from dedicated training materials to achieve better performance and user acceptance, which could lead to faster adoption.

Keywords: Ergonomics; Strain; Occupational exoskeleton; Human-exoskeleton System.

2 Introduction

With the modernization of industry, new assistive technologies such as passive exoskeletons are cropping up. In industries where tasks still involve human control and knowledge, businesses are cautiously testing passive exoskeletons. These devices could serve to reduce the financial costs of upper body pain and sick leave on businesses (Lambeek et al., 2011) (Dunning et al., 2010). Companies need to consider occupational exoskeletons as a solution that could help reduce task-related musculoskeletal strain. Studies have shown that occupational exoskeletons have certain positive effects, such as reducing muscle demand (Huysamen et al., 2018; Theurel & Desbrosses, 2019), but they also come with some drawbacks such as movement limitation, discomfort (de Looze et al., 2016), low usability, and a lack of user acceptance (Graham et al., 2009). More recently, authors have suggested focusing on actual use of occupational exoskeletons to better understand potential effects (Kim et al., 2018), and encouraging a more holistic approach (Bosch et al., 2017) to investigate dimensions of usability.

Rogers posits that the adoption of new technologies involves a progressive process (Rogers, 1962). The first experience with the product is an important step. Indeed, Huysamen (2018) observed that poor familiarization could be a barrier to usability assessments. As a result, Europe Technologies has been proposing to a global integration program for its prospective customers over the last few years. Because users typically have very little experience with these devices—often only seeing them in science fiction films—this program includes a familiarization protocol designed to foster acceptance and industrial adoption of the exoskeleton. In order to identify different levels of familiarization amongst users, we proposed a scale with different levels of knowledge and practices (Human-Exoskeleton Familiarization Levels) based on our expertise. However, there is no research on the effects of familiarization protocols on exoskeleton users' performance and perception while completing tasks. Consequently, the main objective of this study is to assess the claimed effects of the latest exoskeleton prototype, as well as the effectiveness of a familiarization protocol on the global physical workload, performance, perceived benefits, and acceptance by exoskeleton users.

Additionally, this study also highlights the Human-Exoskeleton Interaction to assist both future product design and user experience design through familiarization programs, and the corresponding levels of familiarization. The second section of this paper presents the material, methodology, and the description of the experiment. The third section presents the results of the experiment. The concluding section provides implications and perspectives for our company, as an exoskeleton supplier.

3 Materials and methods

3.1 Participants and ethics approval

The study involved 16 healthy volunteers with no current injuries or musculoskeletal disorders; each provided written consent (Helsinki form) before the experiment. Their ages spanned from 20 to 47 years old (mean and SD: 32.1 years \pm 7.1). The mean and SD of the operator' mass was 68.4 kg \pm 8.1. The mean and SD of the participants' height was 173.7 cm \pm 5.1. Two operators were female. Operators had never used an occupational exoskeleton before, and they all had at least three months' experience doing arm-elevated tasks, the type of task chosen for the study and the use of the exoskeleton.

3.2 Occupational exoskeleton

The exoskeleton used is a wearable passive system provided by our partner SkelEx (Skel-Ex, Rotterdam, Netherlands) as shown in Figure 49. Its structure provides two flat springs in the back, connected to arm supports. During operation of the exoskeleton, the user loads the springs as he or she lowers his or her arms. When the user raises his or her arms, the springs provide a progressive upward force. The device supplies maximum support at around a 95° trunk-to-arm angle. This prototype aims to reduce upper body strain while performing arm-elevated tasks. The first experimental condition of our experiment is whether or not a user is wearing an exoskeleton, relatively named Exo or NoExo condition.

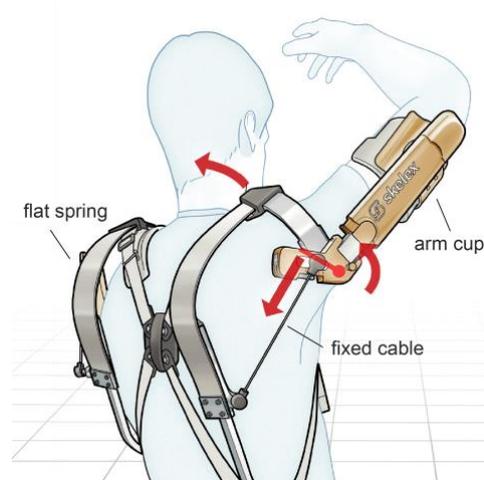


Figure 49. Product architecture and the underlying mechanical principles of the tested exoskeleton prototype.

3.3 Familiarization protocol

While uptake of exoskeletons by industry has been gradual, businesses often skip or minimize the familiarization process, which may result in greater rates of rejection by occupational users. For the purposes of this study, we have experimented with two levels of familiarization protocols (F1 and F2). The type of familiarization protocol is the second independent variable of the experiment. The protocol F1 involves familiarization using the manufacturer's brochure, which includes basic information on the specifications of the exoskeleton, an example of how to put the exoskeleton on, and adjustments advice (Annex 6). The team based the second familiarization protocol F2, on Europe Technologies' field expertise. F2 is a part of an integration program dedicated to facilitate exoskeleton adoption. This familiarization stage involves the participants attending an expert tutorial, which the researchers designed to optimize the participants perceived benefits, performance, and acceptance of using the exoskeleton. We based the F2 expert tutorial on the knowledge and practice of businesses, and designed it so instructors can administer the tutorial as quickly as possible (to meet the real time constraints businesses face). The following learning and practice steps comprise the F2 protocol:

- Demystification: clarify the capabilities of the exoskeleton
- Technical principles: explain how the passive system works
- Potential and limits: detail what a user can and cannot do with the exoskeleton
- Donning, adjusting, and doffing: provide the user with detailed instructions for each

- Free moves (without constraints): allow the user to freely experience effects and limitations
- Training scenarios: provide users with hands-on movement training for industrial tasks

In addition, the F2 tutorial aims to provide a user with certification by reaching level 4 on a familiarization scale (Annex 6). To reach level 4 on the scale, a participant must be aware of basic technical, safety, and operating principles, and know how to don and remove the exoskeleton quickly and safely in less than 100 seconds.

In the following experiment, a qualified experimenter administered the F2 tutorial using a written scenario. The participants experienced either the F1 or F2 familiarization protocol before performing the stipulated task. If necessary, participants could readjust the exoskeleton between tasks. They were allowed to stop the test if needed however none did it. Participants were allowed to read the brochure (F1) or to ask the experimenter to repeat an item in tutorial (F2). However, the experimenter was not allowed to actively assist the participants.

3.4 Testing equipment

We used a heart rate computer POLAR RS800CX and its dedicated software POLAR Trainer 5 to monitor and analyse the heart rate during the tasks. This system is composed of a transmitter that can be attached to a chest belt. After the acquisition, the data is transferred from the transmitter to the software via an infrared USB dongle. All tasks are recorded by the camera in order to check postures and gestures and to facilitate the interpretation of the results. A field observation grid was used to record all postures, events, and participant comments during and after the experiment.

4 Experimental design and procedure

4.1 Field task

Real situation experiments took place between January and August 2019 on the site of the Airbus Nantes Company. The Company permitted us to conduct our experiments in a workshop, focussing on a task previously identified by the internal ergonomist as physically demanding with arm-elevated postures. This task provokes arm-elevated postures for about 30 minutes to one hour. While doing this task, operators must perform repetitive and precise assembly movements, placing nuts on a vertical plane at a distance of approximately 50 cm to

210 cm from the ground. Figure 50 shows a worker performing the task. The exoskeleton used in this test was specifically designed to assist with strain associated with arm-elevated postures. Furthermore, the task also requires very high-quality standards that involve precision and constant visual control. We used questionnaires to ensure that the operators met these exacting quality standards (see the Results section on Occupational Aspects).



Figure 50. The task involves performing vertical assembling operations in arm-elevated posture.

4.2 Procedure

We directed the operators to rest for 10 minutes before starting the experiment. The operators performed the test twice, either with (Exo experimental condition) or without an exoskeleton (NoExo experimental condition), depending on which experimental group they were part of. The operator was required to install metal parts on a metal plane, along a vertical line. Figure 51 shows the asymmetrical shape of the vertical plane. To assign similar tasks for each experimental condition (NoExo or Exo), each side of the line corresponds to a particular condition. Between tasks, operators filled a questionnaire while remaining seated.

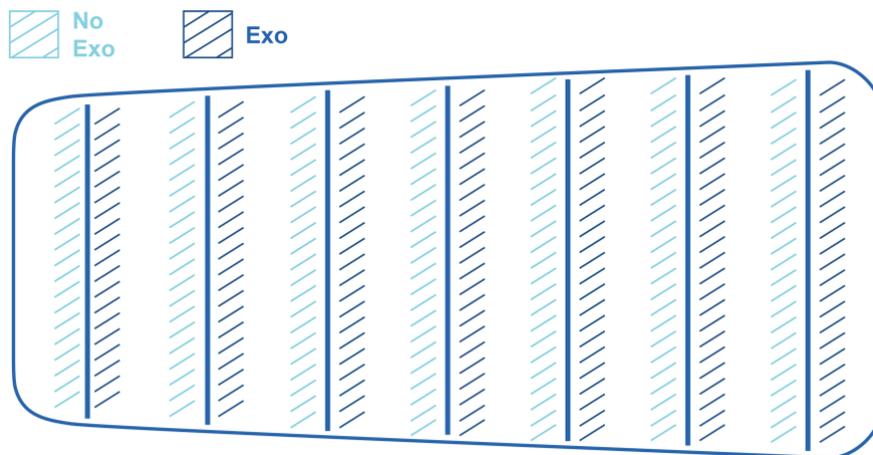


Figure 51. Spatial distribution of the Exo/NoExo conditions on the vertical plane. The operator was required to assemble metallic pieces on this asymmetrical vertical plane. The operator installed the pieces on each side either with (Exo) or without an exoskeleton (NoExo).

5 Objective measurements

Familiarization performance of donning/adjusting

After the participant had been taught about the exoskeleton using either the brochure or a tutorial (F1, F2), we measured the duration of the donning and adjusting procedure using a chronometer. We organized the timeline as follows:

- minutes for the participant to read the manufacturer's brochure or to listen to the tutorial performed by a qualified instructor;
- minutes for the participant to then individually test the exoskeleton;
- minutes for the participant don the exoskeleton and adjust it.

We designed the timeline to be realistic and in accordance with business time constraints. The time recording stopped over these 3 minutes. This time limit was developed using focus groups with project members as a standard to allow operators flexibility while performing different tasks.

5.1 Global physical workload

We recorded participants' reference heart rates (Hr) while seated, 5 minutes before the participants performed the tasks. Two activity blocks were analysed based on the NoExo and

Exo conditions. These two tests were separated by a 10 minutes break, during which operators rested while sitting down. To compare the Exo and NoExo conditions, we calculated the Absolute Cardiac Cost (ACC) based on the duration (d) of the activity and in accordance with the Meunier protocol (Meunier, 2014). ACC is the difference between the average heart rate (Ha) and the reference heart rate (Hr), expressed in beats per minute (bpm). $ACC \cdot duration$ is expressed as the heart rate (acceptable) according to the duration of the task (in minutes), which means: $ACC \cdot d = (Ha - Hr) \cdot d$. It represents the number of pulses 'consumed' during the task. Figure 52 illustrates the definition of the Absolute Cardiac Cost.

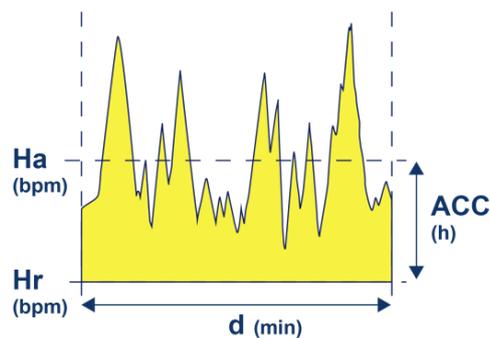


Figure 52. $ACC \cdot d$ is the difference between Reference Heart rate (Hr) and Average Heart rate (Ha) expressed in beat/min multiplied by task duration (min).

5.2 Tasks performance

We measured the task performance based on two factors: the number of errors made by the participant and the duration of the task. An error occurred whenever an operator had to redo or correct something they did while performing the task. Again, the experimenter measured the duration using a chronometer. For confidential purpose, task duration will not be detailed.

5.3 Subjective measures

Perceived musculoskeletal strain was assessed in accordance with the Borg Scale CR-10 (Borg. G., 1970). We used a questionnaire measuring four aspects (cognitive, occupational, physical, and affective), based on a previous study (Moyon et al., 2019), to record the user's perceived effects of exoskeleton on task performance. The goal of the questionnaire was to obtain information on the following factors, scored using a Likert scale (0-10): ease of learning, evolution of perceived musculoskeletal effort, perceived usability for industrial constraints, physical comfort, and an acceptance score composed of three questions (willingness to use the

exoskeleton daily (WTU), likelihood to recommend (LTR), and global satisfaction after use). This paper will provide further detail about these questions before the presentation of the results.

6 Design of experiments

The experiment has two experimental conditions: whether or not the subject was using an exoskeleton (Exo/NoExo) and the type of familiarization protocol used to teach the user about the exoskeleton (F1/F2). Because a familiarization protocol was only used for the Exo condition (the user was only administered a familiarization protocol if they were going to be using an exoskeleton), the familiarization variable does not apply to the NoExo condition. -Furthermore, each operator was only exposed to one of the two familiarization protocols (F1 or F2) because of the learning effect (once one protocol F1 or F2 is administered to an operator, he/she is too skilled to experiment with the other protocol). For this reason, only an independent group experiment can be done. Sixteen participants (n=16) were randomly assigned into two groups of eight participants. The Table 10 shows the familiarization protocol structure assigned to each group; all the participants performed the NoExo condition. The order of the experiments (with (Exo) or without (NoExo) was balanced.

Table 10. Experimental design for the two variables, the exoskeleton and the familiarization protocol, with two conditions NoExo/Exo and F1/F2. The rows correspond to the first combination tested by the participants (for example, eight participants from Group 1 tested the NoExo condition first, and then the Exo condition with protocol F1).

	NoExo	F1 Exo	F2 Exo
Group 1 (8 subjects)	X	X	-
Group 2 (8 subjects)	X	-	X

7 Data Analysis

The study investigates the significant differences in user performance (global physical workload, task performance), perceived benefits and acceptance (questionnaire) when wearing or not wearing an exoskeleton on the task. To perform this investigation, we analysed

differences in the NoExo/Exo conditions using an ANOVA (analysis of variance), a mixed linear model, where the subject is a random effect and the exoskeleton condition as a fixed effect. We also used a one-tailed, one-sample t-test to determine a statistically significant threshold for Exo condition subjective results. Furthermore, the effectiveness of the familiarization protocol (F1/F2) was analysed on the same variables (user performance, perceived benefits and acceptance) and only for the Exo condition, using a two-sample one-sided or two-sided t-test. This t-test calculates the difference between the mean results of the two groups. The statistical significance was set to $p < 0.05$ (*) and $p < 0.001$ (**). Finally, in order to better understand the interactions between the variables (Lebart et al., 1995), we calculated a standardized principal component analysis (PCA). We performed the statistical analyses using XLSTAT 2019 software (Addinsoft, Paris, France). For each dependent variable, the results for the different conditions are reported as means (with their standard errors) in original units.

8 Results

8.1 Study of the exoskeleton effects

8.1.1 Effects on Global physical workload

The values of ACC*d for the two conditions (No Exo/Exo) are shown in Figure 53.

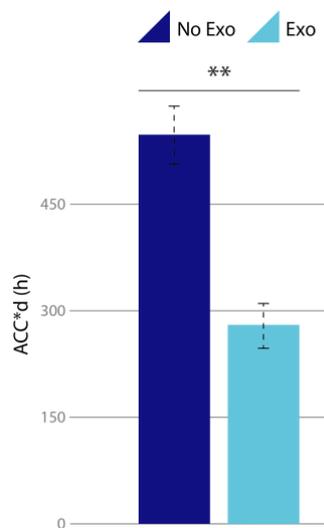


Figure 53. Evaluation of ACC*d (acceptable) for the task with (Exo) and without (NoExo) exoskeleton. Errors bars indicate standard deviation, brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (* $p < .05$, ** $p < 0.001$).

The lowest ACC*d values were found while the user was wearing the exoskeleton (Exo condition), with a significant decrease of 280 acceptable ± 33 ($p=0,0004$). This corresponds to about 49% of the NoExo value. Wearing the exoskeleton has a significant effect ($P < 0.001$) on the ACC*d variable. Based on this indicator of global physical workload, we can conclude that wearing the exoskeleton while performing this task can help to reduce a user's global strain.

8.1.2 Effects on industrial task performance

Figure 54 presents the number of errors that participants made while completing the task for each of the two conditions (Exo/NoExo). We observed fewer errors (1.76 ± 0.43 compared to 2.38 ± 0.55) when participants were wearing the exoskeleton. However, the difference in the number of errors between the Exo/NoExo conditions is not statistically significant ($p=0.44$).

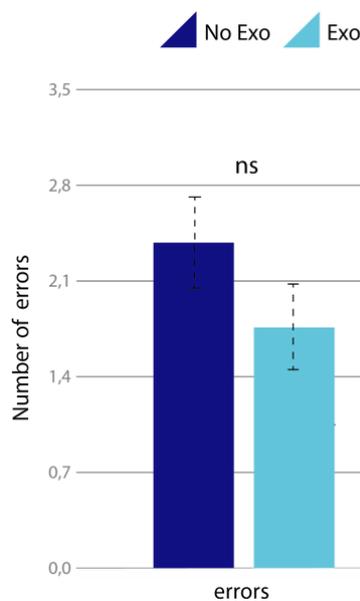


Figure 54. Number of errors committed for the task. Brackets indicate significant differences between (Exo) and without exoskeleton (NoExo) condition. Errors bars indicate standard deviation. Asterisks indicate significant difference (ns = non-significant).

Although the differences are not statistically significant, the participants' performance of the industrial task improved slightly while using the exoskeleton; participants made fewer errors. Importantly, however, these results show that there is no negative effect of wearing the exoskeleton. Use of the exoskeleton does not increase the number of errors that participants made.

8.2 Subjective measures for Exo condition

In order to determine if the exoskeleton is useful to perform the industrial task, we examined the development (between NoExo and Exo conditions) of the four dimensions reported in the questionnaire: cognitive, occupational, physical, and affective (Appendix 4).

8.2.1 Physical aspects: evolution of the perceived musculoskeletal strain

Questions :

'With the exoskeleton, my perceived global strain is' (nonexistent-unbearable)

'With the exoskeleton, my perceived local strain (for various body parts) is' (nonexistent-unbearable)

The study evaluated global strain for the task, with a mean of $7.7/10 \pm 0.3$ for the Exo condition, and $4.1/10 \pm 0.2$ for the NoExo condition. The results indicate that participant's global strain was lower when wearing the exoskeleton, with a statistically significant ($p < 0.0001$) reduction of global strain of about 47%. Dotted lines in the Figure 55 represent these values.

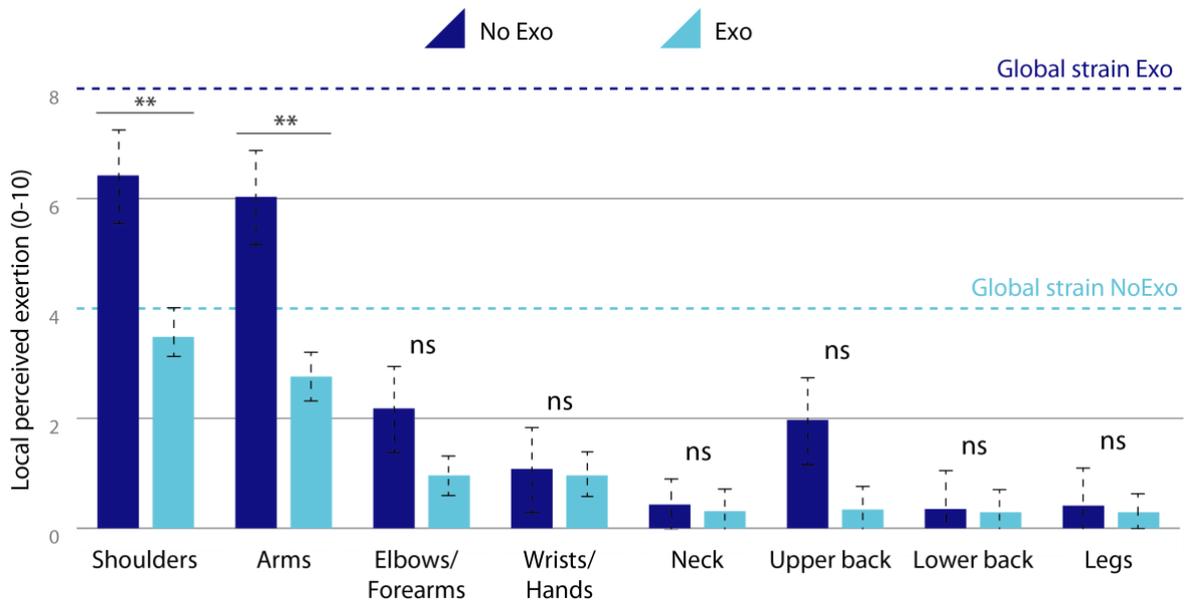


Figure 55. Evaluation of local perceived effort for specific parts of the body without (NoExo) and with Exoskeleton (Exo). Errors bars indicate standard deviation, brackets indicate significant results. Asterisks indicate significant difference (* $p < .05$, ** $p < 0.001$, ns: non-significant).

The results show that when participants wore the exoskeleton, they reported consistently lower scores of perceived local strain, as shown in Figure 7. However, only the reported decreases on the Shoulders ($-2.9/10 \pm 0.3$; $p = 0.0003$) and Arms ($-3.2/10 \pm 0.5$, $p = 0.003$) are statistically significant. Furthermore, participants only perceived a significant reduction of strain on upper parts of the body. This result is consistent with our expectations, given that the exoskeleton operates mainly on the arms of the participant. Participants reported that local strain on other parts of the body (such as the elbow/forearm and the neck) were not significantly reduced when wearing the exoskeleton, which suggests that it may not be effective for these parts of the body.

8.2.2 Cognitive aspects, affective aspects, acceptance score.

Questions:

'Learning how to don and adjust the exoskeleton is easy' (strongly agree–strongly disagree)

'The support the exoskeleton provides when performing the tasks is' (not important at all–extremely important)

'Learning to move with the exoskeleton is easy' (strongly agree–strongly disagree)

'The exoskeleton is comfortable' (extremely uncomfortable–extremely comfortable)

'When using the exoskeleton, I feel' (much less effective–much more effective)

Three-Dimensional Acceptance questions:

Q1: 'My global satisfaction with the exoskeleton is (extremely low–extremely high)

Q2: 'If needed, I would use the exoskeleton (never–everyday)

Q3: I would recommend the exoskeleton to a colleague (not at all–absolutely)

Two 'reverse' questions:

'Using the exoskeleton requires extra focus demand' ((strongly agree–strongly disagree)

'Mastering the use of the exoskeleton involves effort' (not important at all–extremely important)

The participants' answers to the questions regarding the benefits of use of the exoskeleton (Exo condition) were scored from 0–10 on a Likert scale. A one-tail one-sample t-test was then applied to this data to determine a statistically significant difference from 5/10. This process was done only for the Exo condition. Figure 56 shows the scores obtained. Except the two 'reverse' questions (effort to master and requires extra focus), results which are less than five are interpreted to mean that the exoskeleton had a negative effect and results that are greater than six as a positive effect. A score between five and six was deemed to indicate an average effect or indecision. For the 'reverse' questions, effort to master and requires extra focus, results which are less than five are interpreted to mean that the exoskeleton had a positive effect and results greater than four are interpreted as a positive effect. A score between four and five was deemed to indicate an average effect or indecision.

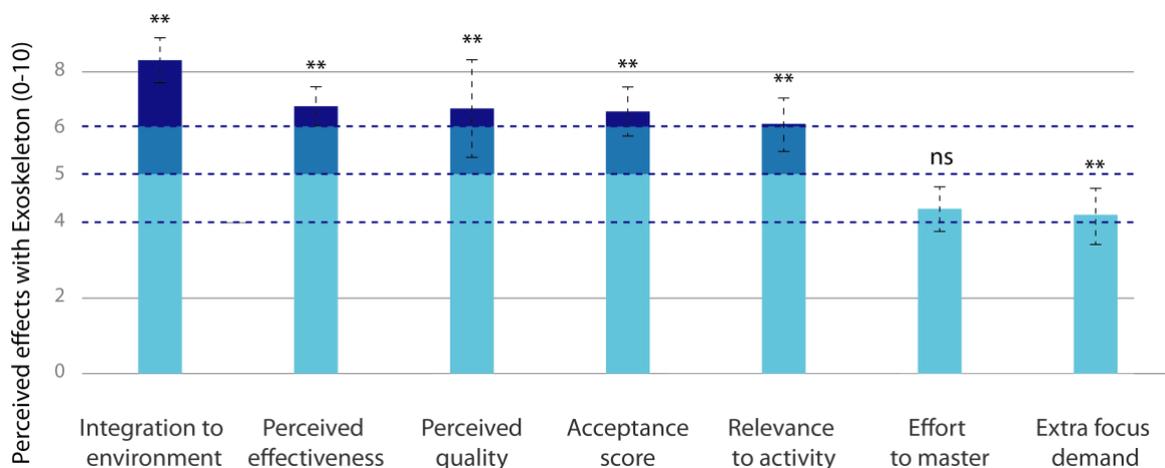


Figure 56. Average scores of perceived effects while wearing the exoskeleton (Exo). Error bars indicate the standard deviation. Dotted lines indicate the corresponding upper limit (6/10), lower limit (4/10), and t-test mark (5/10). Asterisks indicate significant difference (* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, and ns: non-significant).

Regarding affective aspects, no participant found that wearing the device was devaluing. Global Acceptance score was significant (Acceptance score = 6.95 ± 0.65) and participants were eager to recommend the exoskeleton to a colleague. The validity of three questions toward a global Acceptance dimension is verified by alpha's Cronbach > 0.80 . This high value of Cronbach alpha allowed us to calculate the average value of the three scales and perform the T-test. Concerning Cognitive aspects, Perceived performance was positively significant (mean = 6.37, lower mark interval: 5.56, $p = 0.005$), participants reported that wearing the exoskeleton didn't imply an important extra focus demand (mean = 4.31, upper mark interval: 5.57, $p = 0.17$) neither a major effort to master (mean = 4.37, upper mark interval: 5.32, $p = 0.13$).

8.2.3 Occupational aspects: relevance to activity, integration in environment

Questions:

'The exoskeleton could be effectively integrated in my work environment' (strongly disagree–strongly agree)

'I can perform my work at the same quality when using the exoskeleton' (strongly disagree–strongly agree)

'The use of the exoskeleton is relevant to my activity' (strongly disagree–strongly agree)

The results relating to occupational aspects are also presented in Figure 55, above. Participants reported that the exoskeleton was relevant to their activity ($6.62 \pm$, lower mark interval: 5.46, $p = 0.01$). Participants also reported that the exoskeleton allowed them to do perform the same quality of work as they would without an exoskeleton (mean = 7.06, lower mark interval: 5.49, $p = 0.01$), and that they could easily integrate the exoskeleton into their work environment (accounting for environmental factors such as dust, tool storage, etc.) (mean score: 8.31, lower mark interval: 7.3, $p < 0.0001$).

Moreover, the participants also indicated other potential effects the exoskeleton had on posture and work process. In order to optimize the effect of the exoskeleton when working above shoulder height, participants might change their habits by working on their knees and keeping their arms elevated instead of bending forward. Finally, participants mentioned that the device was not very practical when they lowered their arms. They informed the researchers that they

would probably adapt by working on the most arm-elevated operations with the exoskeleton, and then disengaging the assistance mechanism or removing the exoskeleton altogether to finish the part of the job that is closer to the ground.

We conclude that the use of the exoskeleton on simulated industrial tasks is easy to master, does not reduce a user's work quality, does not affect a user's perceived performance, and does not require an important extra focus demand. Additionally, wearing the exoskeleton for the task in this study reduced the global strain on targeted muscle groups, such as the shoulders and arms, although this was not the case for all muscle groups. In particular, elbow/forearm and wrist/hand strain were not significantly reduced. Finally, the device is helpful to performing the activity and could be easily integrated into the work environment. A few changes in habits and processes could occur to face flexibility limits of the current system.

8.3 Effectiveness of familiarization protocol (F1/F2) for Exo condition

8.2.1 Donning performance

The Figure 57 displays participants' exoskeleton donning performance, based on the familiarization protocol (F1 and F2). The graph expresses donning performance in seconds. Depending on the maximum duration allowed by our industrial partners, records might have been limited to 180 seconds. The dotted line indicates the target level time to reach Level 4 of our internal scale of Human-Exoskeleton Familiarization Levels (HEFL). This level is required to obtain user certification in our exoskeleton integration program. Results showed a significant decrease of donning performance with the shortest duration of 112.4 ± 3.0 s for F2, versus 168.9 ± 16.0 s for F1.

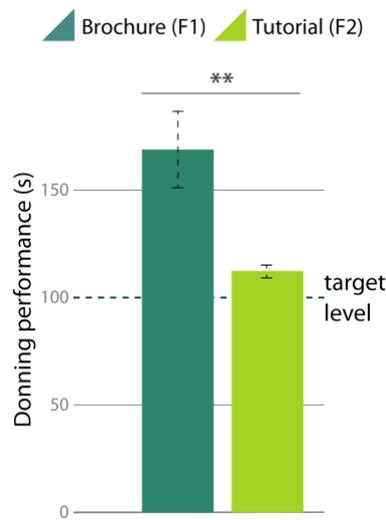


Figure 57. Evaluation of donning/adjusting performance (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).

The results show that the F2 protocol has a positive effect on donning/adjusting performance with an average duration close to the target level of 100 seconds. Familiarization using the manufacturer's brochure (F1) was much less efficient, with the mean donning time well over 100 seconds. Notably, five participants who learned how to put on the exoskeleton using the brochure reached the time limit of 180 seconds.

8.2.3 Effect on global physical workload

The evaluation of the variable ACC*d is shown in the Figure 58. Where participants learned how to use the exoskeleton through the F2 protocol, the lowest ACC/d values. For F2 participants, ACC*d for the task was significantly reduced, by approximately 58.8% ($213h \pm 32$).

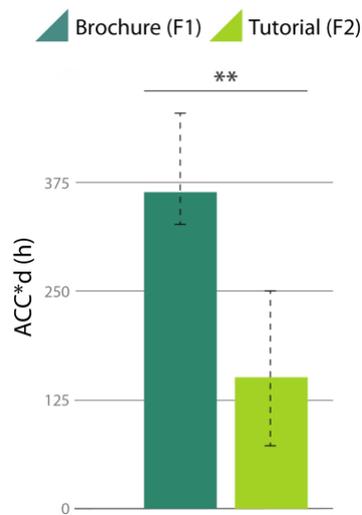


Figure 58. Evaluation of global physical workload (seconds) according to familiarization protocol (F1 or F2).

The results show that the F2 protocol had a positive effect on users' global physical workload. All participants who learned how to use the exoskeleton via the F2 protocol had significantly reduced global physical workload while performing the task ($p=0.0002$).

8.2.4 Effectiveness on task performance

The Figure 59 shows the average number of errors for participants, depending on which familiarization protocol they used. The lowest numbers of errors (0.75 ± 0.73 , $p= 0.014$) were found while participants experienced the F2 protocol.

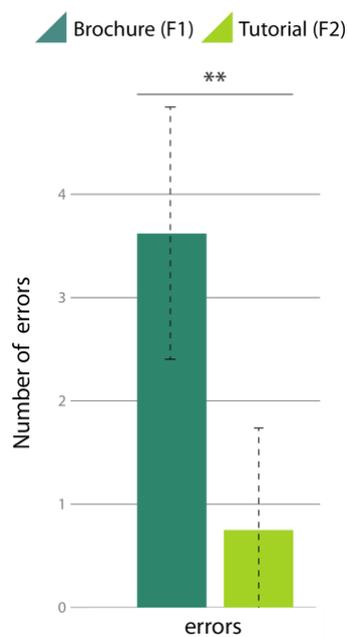


Figure 59. Evaluation of the number of errors committed according to familiarization protocol (F1 or F2). Asterisks indicate significant difference (* $p < .05$, ** $p < 0.001$).

Participants who learned how to use the exoskeleton via the F1 protocol reported that they did not feel confident about performing the task correctly. Furthermore, every time the participant made an error, they had to lower their arm to pick up the nut from the floor and redo the operation. This forced their shoulders and arms downwards, which likely would be more tiring and detrimental to their performance.

8.4 Perceptive results for familiarization protocol

The effectiveness of each familiarization protocol (F1/F2) on these variables was verified by using a two-sample two-sided t-test to compare the means of the two groups. The results show higher scores on a Likert scale (0-10) when participants were educated using the F2 familiarization protocol. In fact, the results showed that the F2 familiarization protocol positively influenced all of the listed variables. The questionnaire provided insight into four aspects of exoskeleton use: cognitive, occupational, physical, and affective. Finally, we comment on the end-user acceptance score. This paper does not discuss the participants' answers to the affective aspects because none of the participants felt devalued by the exoskeleton. The four-dimensional results of the questionnaire are presented in Figure 60 (physical aspects), Figure 61 (cognitive aspects and user acceptance), and Figure 62 (occupational aspects).

8.4.1 Physical aspects

For participants who were educated about the exoskeleton using the F2 protocol, the results show that the most significant differences were with respect to the following categories: easiness of movement (+4.9/10), perceived support (+2.7/10), and perceived comfort (+2.1) (see Figure 60).

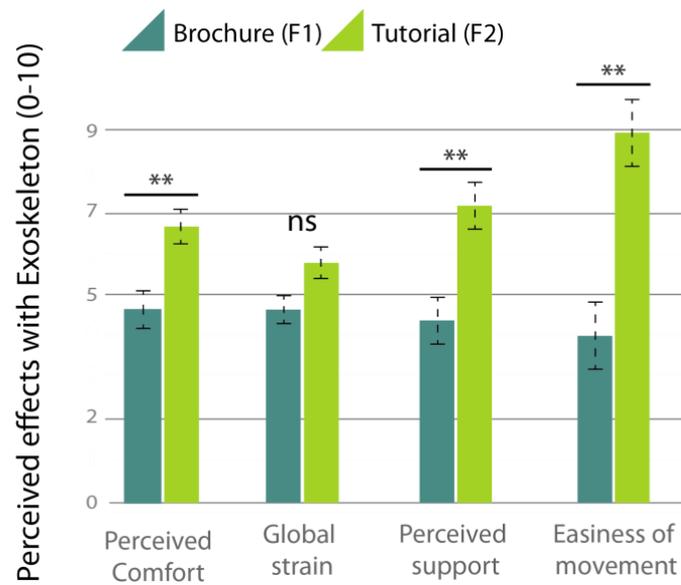


Figure 60. Mean score differences between F1 and F2 in regards to perceived physical benefits. Asterisks indicate significant difference (* $p < .05$, ** $p < 0.001$, ns : non-significant).

8.4.2 Cognitive aspects and user acceptance

The Figure 61 shows the participants reported results with respect to easiness of learning (donning and adjusting) with an increased mean score of +3.9/10, easiness of use (+3.5/10), relevance to activity (+3.5/10), whether extra focus was required (-3.88/10), and the effort to master the use of the exoskeleton (-2.7/10). No participant found that wearing the device was devaluing (affective aspect). The global acceptance score was high (6.9/10), and participants were eager to recommend the exoskeleton to a colleague.

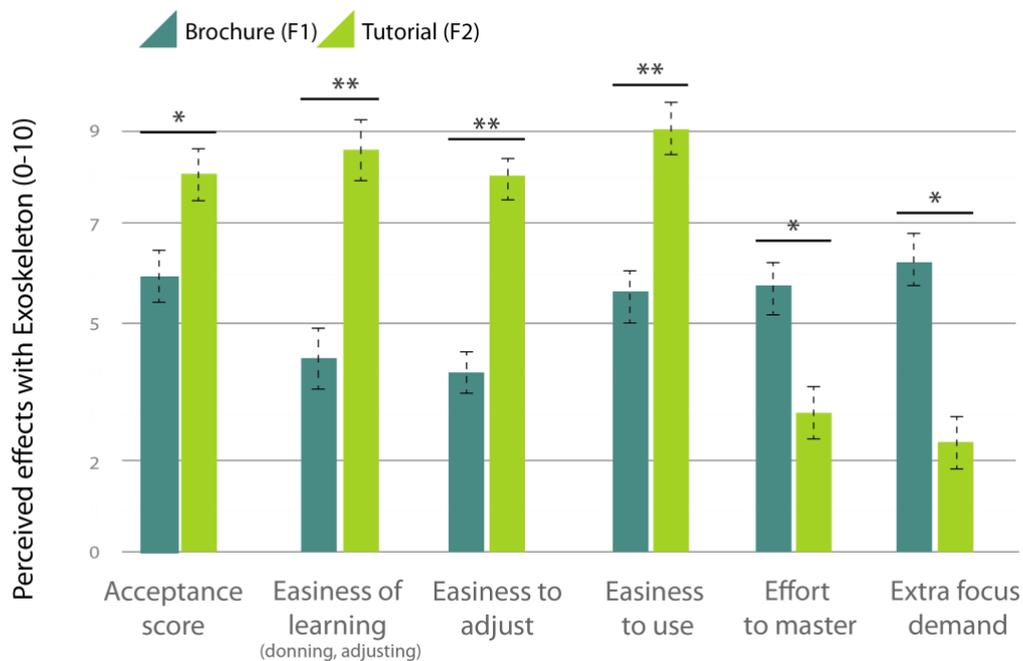


Figure 61. Mean score differences for cognitive aspects and user acceptance between the F1 and F2 protocols.

8.4.3 Occupational aspects

The results show that participants felt the F2 protocol was superior to F1 for occupational aspect variables, as shown in Figure 62.

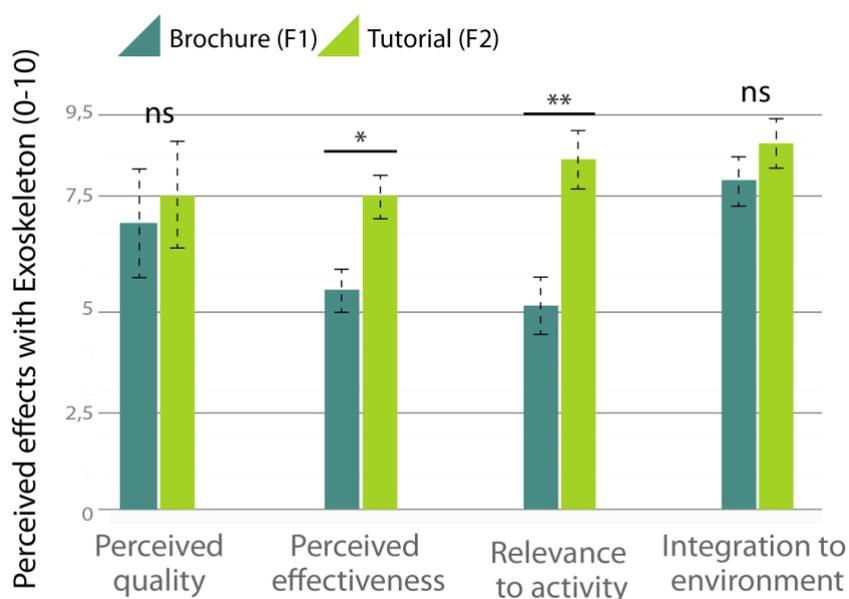


Figure 62. Difference of mean score between the F2 and F1 protocols for benefits related to Occupational aspects.

For participants who were taught how to use the exoskeleton through an expert tutorial (F2), we found that they reported better perceived performance (+2.2/10), a better perception of how the exoskeleton could be integrated into the work environment in the future (+0.9/10), and more relevance to the activity (+3.5/10).

8.4.4 Explanatory correlations

In order to better explain the interactions between the different variables, we calculated a standardized principal component analysis (PCA) on the following variables: objective performance (cardiac cost, number of error, and donning duration), perceived physical benefits (perceived comfort, perceived global strain support, and ease of movement), cognitive aspects (ease of learning, ease to adjust, ease of use, effort required to master, and extra focus required), and occupational aspects (integration to work environment, perceived quality, perceived performance, and relevance to activity). The familiarization protocols (F1/F2 conditions) served as observation variables. Participants were named S1–S8, according to their group (for example, F1S1 refers to participant S1 of the F1 group). Figure 63 shows the results. Acceptance score is shown in blue as it is introduced as a supplementary variable and to better distinguish it from the other variables.

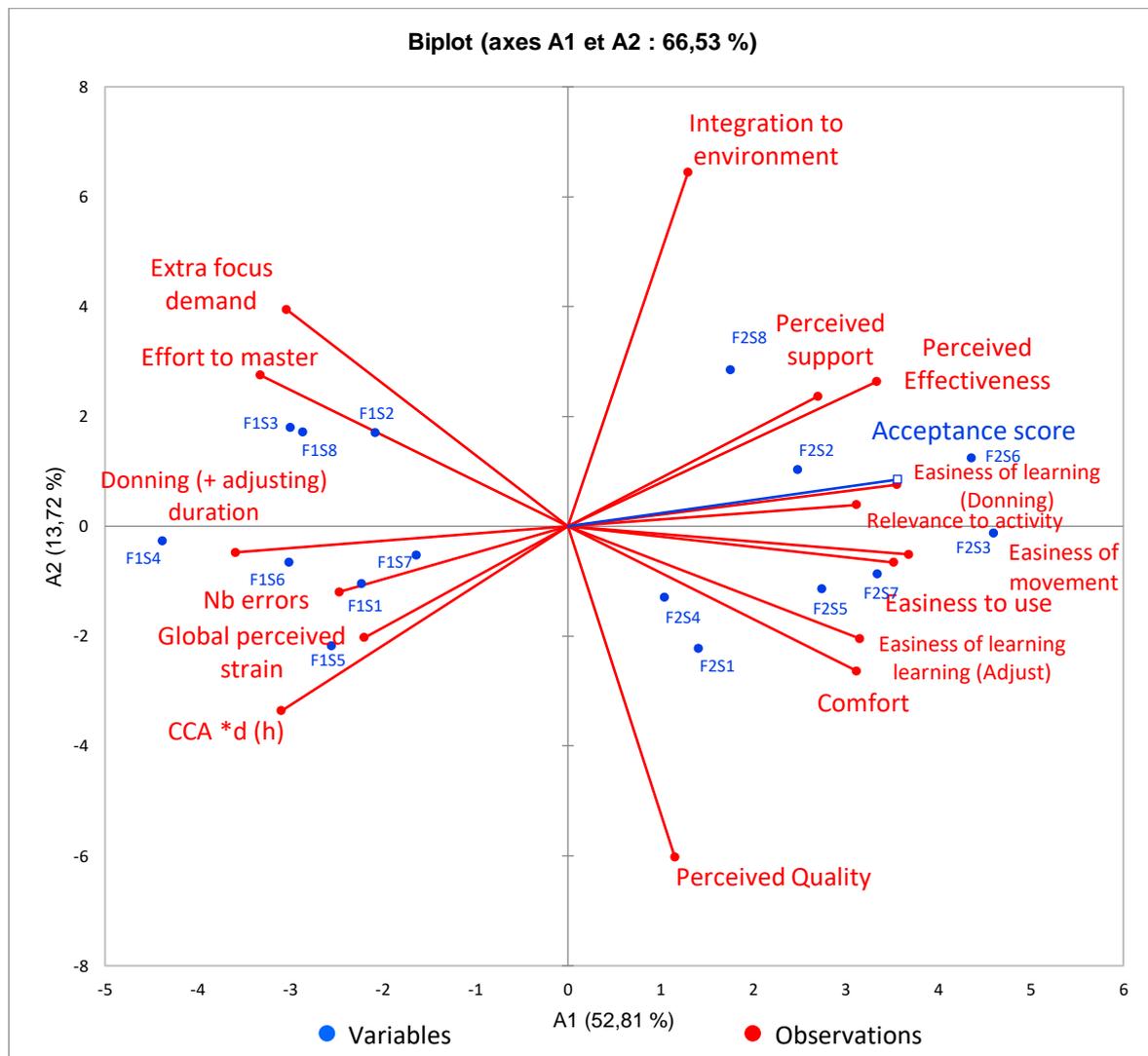


Figure 63. Biplot of the PCA according to the first two principal components A1 and A2.

These results show a strong positive correlation between the first principal component (A1) and the following dependent variables: acceptance score, perceived support, perceived performance, ease of learning (donning and adjusting), integration to activity, ease of movement, ease of use, integration to the work environment, perceived comfort, and perceived task performance quality with 52.8% of the initial data. From this, one can infer that the acceptance score is strongly correlated with these variables. The observations on the right side of A1 Axis (blue points F2) are all related to the F2 condition, which suggests that the F2 protocol results in higher scores for these variables. Conversely, all of the observations relating to the F1 condition are located on the left side of the first component. The acceptance score, which includes predictive dimensions (such as willingness to use the

exoskeleton daily and likelihood to recommend it to a colleague) is negatively correlated with the required effort to master the exoskeleton, the extra focus demand, and the objective performance metrics. This suggests that the less effort required to master the exoskeleton's use, the extra focus required, and the perceived exertion when using the exoskeleton are related to the highest acceptance score.

9 Discussion and Conclusion

This study provides some interesting contributions to research into Human-Exoskeleton Interaction on simulated industrial tasks. It highlights the positive effects of wearing an exoskeleton and the pedagogical efficacy of an expert tutorial as for familiarization with the device in preparation for industrial tasks.

Study of Exoskeleton effects

Once can relate significant positive effects on objective measures (physical workload and performance) to a positive user perception (perceived benefits and user acceptance) of exoskeleton use. This study found lower global physical workload values while participants were wearing the exoskeleton. Furthermore, we observed a decrease of global and local physical exertion, corresponding to *SkelEx*'s initial objectives. However, participants reported that lower movements were more difficult while wearing the exoskeleton and perceived local strain was not equally reduced on all body parts; they found that other muscles could be solicited. Further studies should examine biomechanical effects more precisely. Participants also indicated that wearing the exoskeleton did not reduce the quality of their work, and that it did not require extra focus to use. Even though the participants had to manage this new tool while performing the task, they could perform their work at the same quality level while making fewer errors. We can conclude that the *SkelEx* device does not reduce a user's average performance, even with only a short period of familiarization. All participants reported that they perceived optimal support from the exoskeleton between the eye level to above the head and noticed that the exoskeleton could be uncomfortable for lower tasks. Users considered the device to be appropriate for the activity and felt it could easily be integrated into their work environment (possibly with some changes to the work process or work habits). However, better adaptation of the exoskeleton is needed to avoid maintaining the arm-elevated posture.

Study of Familiarization Protocol Effectiveness

This study also made a number of interesting findings regarding familiarization protocols, particularly about the positive effects of a dedicated expert tutorial compared to users simply reading the manufacturer's brochure. The tutorial, which we designed to provide a reasonable amount of knowledge and practice, generally showed positive effects on both the objective and subjective results as reported by the participants. This tutorial, when contrasted with the brochure, was correlated with superior donning performance, reduced global physical workload, increased task-related performance, perceived benefits, and user acceptance. The results revealed that global physical workload was lower for participants educated using the tutorial than those who experienced the brochure. This suggests that even though the mastery of the exoskeleton could involve some effort by participants, the participants who experienced the tutorial nonetheless performed the tasks better with a lower number of errors. In contrast, the brochure was correlated with a greater number of errors, and more importantly with a negative perception of user performance and work quality. Based on the results, we can conclude that for all dimensions assessed in this study, the F2 tutorial protocol provides better perceived performance, perceived benefits, and user acceptance than the manufacturer's brochure (F1). This difference could also be explained by the difficulty of donning/adjusting the exoskeleton, especially if participants had to perform the tasks with an incorrect or unsatisfactory adjustment of the device on the body. A lack of adjustments could cause physical discomfort and extra cognitive load, forcing unwanted gestures and damaging a user's subjective perception of their performance. Moreover, considering that acceptance score is strongly correlated to ease of learning (donning/adjusting), participants who had a bad first experience donning the exoskeleton perceived lower support and were less satisfied. These results emphasize the importance of the familiarization phase to improve donning performance. This should be of interest to the manufacturer's partners, who can use this information to design a better and more effective familiarization experience.

We conclude that for occupational exoskeletons, a traditional brochure may lead to a familiarization level that is deficient to meet industrial constraints and could negatively influence a user's objective performance, their perceived benefits, and their acceptance of using the device. Interestingly, even with only a short familiarization period, the learning instructions and a user's early experience of use could influence their future performance and acceptance of the exoskeleton. Furthermore, our research shows that the familiarization process must be part of the global integration protocol and that experts should provide instruction. Studying familiarization is challenging as it is a time-related process. However,

the expert tutorial protocol provided positive, statistically significant results, compared to a minimalist familiarization protocol. Furthermore, this research confirmed the need to use levels of familiarization to help users acquire better knowledge and practice specific to their work situation. Finally, this method allowed us to experiment with quickly administered in-house familiarization material to ensure the safety of the participants.

Practical Applications and Recommendations

We have demonstrated that a passive exoskeleton could help reduce strain for users when in an arm-elevated posture, and that decreasing physical strain does not result in an additional cognitive burden for users. However, participants reported that the limitations of the exoskeleton might have an effect on their current work processes, with lower movements being more difficult. To deal with this, users could change their habits and processes to optimize the physical assistance offered by the exoskeleton by favouring arm-elevated posture on the knees rather than bending forward. Users could also divide their work into stages, either with or without the exoskeleton, to minimize bending. The possible effects on posture, associated with a strong willingness to use the device, and potential risk of a load transfer onto other parts of the body, reveal the need to monitor long-term use of exoskeletons. A new ergonomic baseline should be proposed to investigate long-term usability measures. Further research could focus on the application of user experience metrics in order to evaluate the claimed effects and user acceptance factors with the new device.

10 Acknowledgements

This work was supported by Europe Technologies Group who provided the exoskeleton from *SkelEx*. and the Airbus (Nantes) Company who provided volunteers for the tests and a project group (including an ergonomist, a nurse, and workshop managers) for the participatory design of the experiments. However, these organizations were not involved in the analysis of the data and the interpretation of the results, nor in any decision regarding publication.

11 Conclusion du chapitre 5

Les deux articles précédents ont présenté une évaluation des effets du port de l'exosquelette et de leur protocole de familiarisation sur la charge globale physique, la performance de l'opérateur, les bénéfices perçus ainsi que sur le score d'Acceptation global. Le choix des méthodes de mesure a été précédemment réalisé de manière participative (chapitre 4) en incluant opérateurs et experts dans un groupe projet pluridisciplinaire. Ces analyses ont été réalisées sur un second cas d'usage impliquant des opérations d'assemblages de pièces aéronautiques. Ces opérations 'bras levés' ont pu être assistées de manière globalement positive par l'exosquelette et le support de familiarisation interne (tutoriel 'expert') a révélé un effet positif significatif sur certaines variables importantes comme l'effort global perçu ou la performance perçue, malgré un temps court d'expérimentation. Cette étude a également permis de clarifier pour notre projet d'intégration :

- La validation d'un effet globalement positif du port de l'exosquelette, mais en considération de certains points de vigilance sur le manque de flexibilité de l'exosquelette et des adaptations possibles de la situation de travail,
- La nécessité d'un suivi individuel de la familiarisation et de l'utilisation pour mesurer les effets sur un plus long terme. Ce suivi ne pouvant pas se faire avec une analyse posturale classique par l'observation (RULA) puisque la posture n'est pas modifiée avec l'exosquelette, il faudrait proposer de nouvelles métriques. Pour cela, un outil de mesure a été proposé, il sera mentionné dans le chapitre suivant.

Dans la prochain chapitre, nous expliquerons comment nous pouvons utiliser ces résultats d'un point de vue applicatif. Nous présenterons plus globalement les apports de la thèse pour l'entreprise à travers des exemples concrets.

Chapitre 6

Discussion générale et apports pour l'entreprise

Ce dernier chapitre s'articule autour des apports du travail de recherche pour l'entreprise en tant qu'intégratrice d'exosquelette. Dans un premier temps, nous présenterons une synthèse des apports scientifiques issus des expérimentations et leurs intérêts pour l'entreprise. Puis nous détaillerons l'ensemble du protocole d'intégration proposé sur la base des connaissances acquises et commenterons certaines étapes au travers d'exemples concrets. Des outils-supports seront proposés pour chaque étape. Nous détaillerons en quoi l'approche centrée utilisateur a été utile pour le travail de recherche. Plus précisément, en quoi les aspects méthodologiques de simulation en situation réelle et de la prise en compte de l'utilisateur final en amont de la conception ont positivement contribué au développement de la solution.

Nous concluons ce chapitre par une prise de recul sur quelques questions éthiques que doit se poser l'entreprise intégratrice de solution d'assistance à l'opérateur humain.

1 Bénéfices d'un exosquelette

1.1 Bénéfices objectifs et perçus de l'assistance

Les travaux de cette thèse ont mis en valeur plusieurs bénéfices liés à l'utilisation de l'exosquelette sur deux cas d'usage industriels impliquant le maintien d'une posture pénible (bras levés). Une étude holistique employant des méthodes de mesures objectives et perceptives a révélé des effets positifs intéressants pour la réalisation des activités industrielles :

- La réduction de la pénibilité physique de l'opérateur humain : l'hypothèse, a priori, concernant la pénibilité physique était plutôt une augmentation de la sollicitation cardiaque due au poids de l'exosquelette et des efforts potentiellement appliqués par l'opérateur sur les lames-ressorts de l'exosquelette pour maintenir les bras en position basse (pour saisir un outil par exemple). Cependant, l'étude de la cardiofréquencemétrie utilisant les variations du rythme cardiaque comme indicateur de la pénibilité globale a montré une **réduction de la sollicitation cardiaque (coût cardiaque ou 'astreinte' cardiaque)** sur les deux cas d'usage. Dans le cadre de l'expérimentation sur des opérations de ponçage, une réduction importante (environ 20%) a été constatée pour 6 opérateurs lorsqu'ils portaient l'exosquelette. Cette tendance a été confirmée lors de tests pour des opérations d'assemblage de pièces aéronautiques ([Chap. 5, section 8.1.1 Effects on Global physical workload](#)). La réduction constatée sur ce deuxième cas d'usage est plus importante, mais elle n'est pas comparable directement. En effet la tâche est différente (hauteur des bras, poids de l'outil...) et donc n'implique pas la même sollicitation cardiaque. Sur le premier cas d'usage, le rythme cardiaque moyen a été évalué sur une période de travail très longue, ce qui n'était pas possible sur le deuxième cas d'usage. Des tests en laboratoire avec une plus grande variété de participants en termes d'âge, de genre, et non expérimentés aux opérations prescrites ont également confirmé cette réduction (article HFES).

En parallèle de cette mesure objective, une réduction de l'effort perçu était espérée. Un questionnaire individuel a révélé une **réduction importante de l'effort perçu global** sur une échelle de type Likert (0-10) grâce à l'exosquelette, pour les tests en laboratoire ([Chap. 5, section 6.3](#)) et sur le terrain ([Chap. 5, section 8.2.1](#)).

- La non dégradation et/ou augmentation de la performance technique :

Un des enjeux clefs de l'étude des effets du port de l'exosquelette industriel était également de s'assurer que la performance de l'opérateur n'était pas dégradée (nombre d'actions) et qu'il pouvait réaliser les gestes techniques avec la même efficacité (nombre d'erreurs, liberté des mouvements). En effet, on peut considérer que les contraintes physiques imposées par l'exosquelette sont susceptibles de modifier la perception des gestes, d'affecter la liberté des mouvements. Des mesures objectives de la performance (nombres d'actions valides, nombres de signes) ont été analysées en laboratoire et sur le terrain (nombre d'erreur). Aucun objectif de temps de réalisation de la tâche avec l'exosquelette n'a été demandé par l'entreprise, c'est pourquoi ces résultats ne sont pas commentés plus en détail. La non dégradation de la performance concerne également le respect des standards de qualité imposés par l'activité industrielle. Globalement, les questionnaires ont révélé que les participants se sentaient plus performants avec l'exosquelette, arrivaient à maintenir la qualité du travail demandé et à conserver la liberté de mouvement nécessaire. Ces dimensions ont été mesurées sur une échelle de type Likert (0-10) dans la catégorie 'aspect de l'activité' du questionnaire individuel. Globalement les questions posées sur cette dimension ont été intégrées par Airbus.

1.2 Quelques points de vigilance

- Risque de transfert d'effort local : même si tous les participants perçoivent une réduction de l'effort global sur les parties du corps ciblées par l'assistance, la réduction des efforts locaux n'entraîne pas une augmentation ressentie sur d'autres parties du corps, comme les avant bras, les poignets/mains et le cou. Même si nous n'avons pas observé d'aggravation de la sollicitation musculaire perçue localement pour l'expérimentation terrain ([Chap. 5, section 6.3](#)) une aggravation de l'effort local a été évaluée lors des tests en laboratoire qui impliquaient 36 participants ([Chap. 5, section 6.3](#)) sur la partie coude/ avant-bras. Les opérateurs interrogés ont expliqué qu'ils avaient dû plus forcer sur les avant-bras avec l'exosquelette pour 'lutter contre' l'effet de la lame-ressort exercée vers le haut. Cet effet est constaté surtout lorsque les participants ont eu des difficultés pour ajuster l'exosquelette (temps d'installation en dehors du temps limite de 180s) et comprendre ses réglages. Globalement, ces effets sont encore plus importants en fonction du support de familiarisation employé ([Chap. 5, section](#)

6.4.1). Il est donc important de s'assurer que l'utilisateur a bien compris comment installer et bien ajuster les réglages morphologiques de l'exosquelette, régler l'intensité de l'assistance et tester ses limites en ayant réalisé quelques gestes. Cela confirme l'importance de clairement définir des niveaux de connaissance et de pratique pour optimiser l'utilisation.

- L'expérience de familiarisation (avec différents supports) peut dégrader les performances et les bénéfices perçus : l'étude des différences entre les résultats suivant deux niveaux de familiarisation a révélé **une dégradation des performances objectives** et des **bénéfices perçus** pour les deux expérimentations (laboratoire et terrain) du second cas d'usage, lorsque l'on passe d'une familiarisation de type « tutoriel expert » à la « brochure constructeur ». Avec le recul des tests, il est assez clair que si le participant installe mal l'exosquelette, car il manque d'information sur son fonctionnement et ses réglages, il 'subit' l'assistance et cherche à reprendre le contrôle en forçant contre les ressorts ce qui peut expliquer par exemple une perception plus faible de l'assistance et une astreinte cardiaque plus élevée.

Ces effets constituent des points d'intérêt pour nos partenaires industriels qui souhaitent déployer ces solutions d'assistance. Ils aident notre entreprise à mieux appréhender les enjeux de prévention liés aux risques de l'utilisation de l'exosquelette. Ces informations sont aussi des éléments de construction utiles pour concevoir un projet d'intégration de l'exosquelette qui prenne en compte les bénéfices possibles et les risques à éviter.

2 Apports sur l'acceptation et l'utilisabilité de la technologie exosquelette

2.1 Bénéfices des études en situation d'usage

Un état de l'art des concepts autour de l'acceptation des technologies a été réalisé dans le chapitre 2. Cette revue nous donne des facteurs potentiels, mais qui sont dédiés aux sciences informatiques, loin de notre contexte d'exosquelette industriel qui implique un autre mode d'interaction (physique) et des barrières psychologiques propres au système technique (dévalorisation possible de l'assistance ? Effet 'Robocop' ?). Des travaux récents ([Chap. 2, section 2.3.2](#) Les méthodes d'évaluation associées suggèrent plus centrées sur l'usage réel

(et non l'anticipation de l'usage). Pour ces raisons, nous nous sommes concentrés sur l'utilisabilité du système technique et avons employé des éléments méthodologiques exploratoires centrés sur l'utilisateur : une approche écologique (situation de travail réelle), participative (implication du groupe projet et des opérateurs à différentes étapes), et itérative. Ces principes méthodologiques ont été appliqués tout au long du travail de recherche, d'abord dans cette première phase d'étude de l'acceptation puis pour modéliser un protocole d'intégration qui prend en compte les futurs utilisateurs en amont du projet d'intégration. Les apports de la thèse concernant l'étude de l'acceptation sont donc principalement d'ordre méthodologique, par la compréhension des facteurs propres à l'Interaction Humain-Exosquelette comme l'aspect physique et l'importance de la phase de familiarisation.

2.2 Apports méthodologiques concrets

Parmi les apports concrets de cette approche écologique et participative pour la détermination des facteurs d'acceptation et de leur mesure, nous pouvons citer la **modélisation des facteurs d'acceptation**, la proposition de **méthodes de mesures associées** ainsi qu'un **questionnaire à quatre dimensions 'COPA'** (aspects cognitifs, physiques, affectifs, de l'activité), utilisé dans les expérimentations du deuxième cas d'usage. Ce modèle n'est pas généralisé, car il n'a été utilisé que pour un type d'exosquelette et la significativité statistique du questionnaire n'a pas été confirmée. Pour essayer d'enrichir cette approche empirique, une confrontation par des pairs a été effectuée. Huit interviews d'experts en assistance (préventeurs, ergonomes) ont permis de compléter d'autres facteurs pouvant influencer l'acceptation, et donc des freins potentiels au déploiement de la solution exosquelette. Parmi ces facteurs, nous pouvons citer l'impossibilité de débrayer l'assistance lorsque les opérateurs souhaitent baisser les bras pour saisir un écrou par exemple (flexibilité), l'adaptation aux équipements existants (système ventilatoire, protections individuelles...), et l'hygiène. Ces facteurs supplémentaires ont été intégrés dans le modèle final ([Chap. 4, section 3.5](#)). Ce modèle pourrait sûrement être encore complété. Ce modèle d'acceptation et son questionnaire ont servi de base à Airbus Nantes pour formaliser un document officiel pour encadrer l'intégration des exosquelettes. D'après les résultats de la thèse, il a été décidé qu'une nouvelle dimension 'formation/familiarisation' devait s'ajouter comme dimension transversale aux quatre dimensions de base pour prendre en compte le niveau de familiarisation de l'opérateur. Ce document n'est pas présenté en détail pour respecter notre accord mutuel de confidentialité.

2.2.1 Importance de la familiarisation dans l'acceptation

La familiarisation des opérateurs joue aussi ici un rôle essentiel dans l'acceptation globale et la volonté d'utiliser le système. En effet, des supports de familiarisation différents ont eu une influence significative sur les facteurs d'acceptation mesurés, sur le terrain et en laboratoire (Chap. 5, section 6.4.2 et section 8.4). Un support de familiarisation 'classique' (brochure du constructeur) peut avoir une influence négative sur l'acceptation des participants et leur volonté d'utiliser l'exosquelette. Si les résultats sont intéressants du point de vue de la compréhension de l'Interaction Humain-Exosquelette, cela pose des questions importantes de la **conception de cette phase de familiarisation** ; plus précisément sur l'expertise des formateurs, les supports de formation qui doivent être conçus avec une connaissance du modèle d'exosquelette, les contraintes temporelles du client etc. Cela peut constituer des ressources humaines et des contraintes organisationnelles importantes qui doivent être évaluées par les parties prenantes. C'est aussi peut-être aux constructeurs d'exosquelettes de mieux assurer cet aspect, en développant de meilleurs supports d'apprentissage. Dans cette optique, nous avons conseillé notre fournisseur (*Ske/Ex*) sur des éléments qui nous semblaient importants tels que : une meilleure visibilité des réglages, le guidage des opérations directement sur l'exosquelette et le type de média utilisé pour une démonstration plus 'vivante' qui insiste sur certains points liés à l'usage et à la sécurité.

3 Application des résultats : vers un protocole d'intégration

Les résultats des expérimentations permettent de préciser un protocole d'intégration de la technologie exosquelette en entreprise. En effet, les résultats concernant les effets du port de l'exosquelette permettent de justifier l'utilité d'une telle technologie lorsque la posture pénible est adaptée. Quant aux résultats concernant l'acceptation pratique de l'exosquelette, ils nous renseignent bien sur les conditions favorables liées à son utilisation et aux conditions de familiarisation. Sur la base de ces résultats, nous pouvons maintenant mieux détailler les étapes du protocole d'intégration de l'exosquelette. Dans cette partie, certaines étapes clés seront illustrées à travers un exemple concret.

3.1 Processus et étapes principales de l'intégration

Cette démarche vient en support de l'activité commerciale, des préventeurs internes ou externes afin de les guider vers une meilleure intégration de l'exosquelette. Elle est basée sur les résultats des expérimentations et a été mise à jour avec les connaissances acquises sur les trois années de thèse. La Figure 64 représente les étapes principales du protocole d'intégration proposé à l'entreprise. D'une part, les effets globalement positifs mesurés nous confortent sur la pertinence de proposer cette solution si l'analyse de la situation de travail le révèle (situation initiale). Mais cette intégration doit prendre en compte les points de vigilance cités tels qu'une connaissance des principes généraux de l'exosquelette et des points de sécurité, savoir comment bien l'installer et l'ajuster, etc. Cela implique notamment que l'opérateur soit formé et entraîné pour l'utiliser en toute sécurité et en connaissance de ses limites. La solution doit être également évaluée en contexte d'utilisation réel (situation simulée) Lors de cette phase les gestes techniques sont simulés hors du poste, puis des tests peuvent être réalisés sur le poste. La situation adaptée correspond à l'utilisation de la solution. Cette phase inclut des adaptations éventuelles du poste (nécessitant des phases de : proposition, tests, modification/validation) et la mesure de l'adoption selon des critères définis en amont, comme la fréquence d'utilisation, ou le temps d'utilisation.

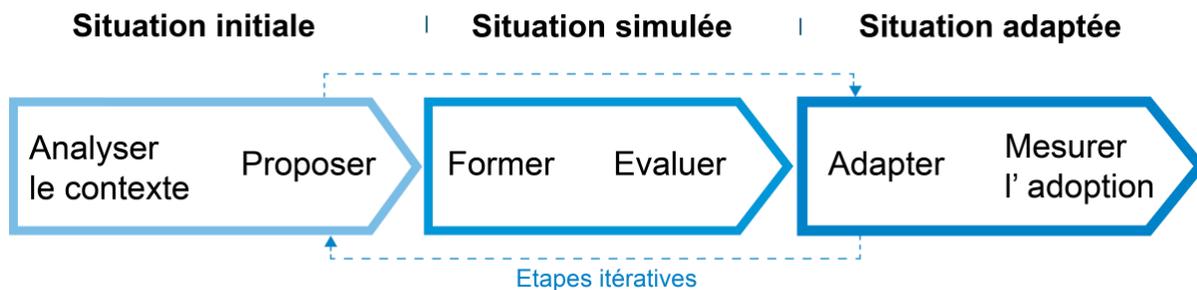


Figure 64. présentation du processus global d'intégration d'un exosquelette (rôle de l'intégrateur). Les flèches en pointillé représentent le caractère itératif des étapes.

Certaines étapes aussi sont participatives car elles impliquent la participation des opérateurs et/ou du groupe projet, plusieurs échanges sont nécessaires avant de proposer les protocoles de tests ou des adaptations de postes par exemple. La Table 11 présente le détail de chaque étape.

Table 11 : Étapes générales de conception du projet d'intégration d'un exosquelette industriel.

<p>Analyser le contexte</p> <ol style="list-style-type: none">1. Observer, Ecouter, Apprendre2. Analyse ergonomique de l'activité initiale3. Définir les critères fonctionnels et perceptifs du besoin4. Présenter des principes de solution5. Evaluer le niveau de connaissance et pratique (HEFL)
<p>Proposer</p> <ol style="list-style-type: none">1. Cahier des charges fonctionnel et perceptif2. Proposer si possible une solution existante et un plan d'intégration3. Définir le TRL de la solution (base existante ou à concevoir)4. Définir les facteurs d'acceptation de la solution5. Définir les protocoles des tests (scenarios d'usage, questionnaires...)
<p>Former</p> <ol style="list-style-type: none">1. Mise à niveau des formateurs sur les produits2. Amélioration continue des contenus et supports3. Intégrer la démarche qualité client4. Proposer un plan de formation adapté5. Réaliser les formations sur le terrain6. Délivrer la certification 'Users' (si HEFL=4)7. Délivrer la certification 'Super Users' (si HEFL=7)
<p>Evaluer</p> <ol style="list-style-type: none">1. Valider le déroulé du protocole de test2. Tests avec scénario gestes techniques hors poste3. Test situation réelle4. Analyse de la situation (observations, interviews...)
<p>Adapter</p> <ol style="list-style-type: none">1. Valider l'intégration de la solution. Ou : Proposer une adaptation du poste (artefacts)3. Tests avec les modifications4. Validation de la situation modifiée
<p>Mesurer l' adoption</p> <ol style="list-style-type: none">1. Proposer et personnaliser les métriques de suivi2. Proposition de suivi (Analyse des données, déploiement du process, stockage, maintenance...).

3.2 Proposition d'outils-supports pour accompagner les phases du projet

A chaque phase du projet d'intégration, différents outils ont été utilisés. Ils sont communément utilisés dans un projet de conception centrée utilisateur, certains ont dû être adaptés au contexte d'utilisation. Ils sont présentés au groupe projet puis destinés au chef de projet (CP), aux préventeurs (PS), au formateur (F) ou bien à l'ensemble des parties prenantes, c'est-à-dire le groupe projet (G). Si besoin, certains outils peuvent être personnalisés pour mieux s'appliquer au contexte de l'utilisation future de l'exosquelette ou de la politique de prévention/sécurité du partenaire par exemple. La Table 12 présente une liste d'outils proposés et par quel type de collaborateurs ils pourraient être utilisés. La répartition des outils en fonction des statuts peut varier selon les entreprises.

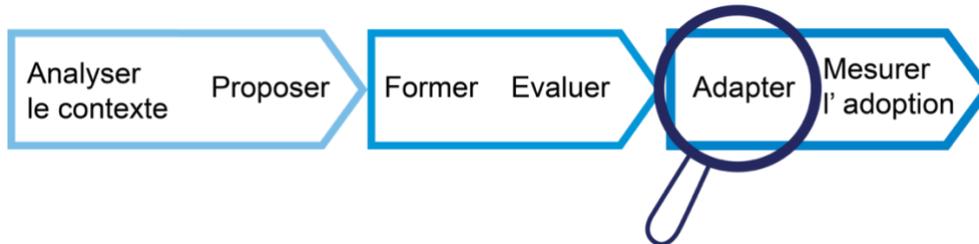
Table 12 : Proposition d'outils en support de l'application des phases du projet. Ils sont utilisés par le chef de projet (CP), le formateur (F), les préventeurs (PS) ou l'ensemble du groupe projet (G).

	Outils en fonction des phases du projet	Utilisés par
Analyser	Grille d'observation	CP, PS
	Grille d'interview, questionnaire	CP, PS
	Tâche réelle commentée	CP, PS
	Scenarios d'usage	CP
	Focus group	G
Proposer	Cartographie des parties prenantes	G
	Cahier des charges objectif et perceptif	CP
Former	Plan de formation à jour pour le formateur	F
	Supports du constructeur	F
	Supports internes (protocole de familiarisation, tutoriel...)	CP, F
	Echelle de familiarisation (HEFL)	CP, F
	Certificat d'aptitude à l'utilisation	F
Evaluer	Choix des méthodes de mesures : Focus group	G
	Protocoles de tests avec scénarios d'usage : script, story boards.	CP, PS
	Outils de mesures associés	CP, PS
	Grille d'observation, enregistrement vidéo	CP, PS
	Grille d'interview, questionnaire	CP, PS
Tâche réelle commentée	CP, PS	
Adapter	Cahier des charges	G
	Prototype/ artefacts	CP
	+ outils de la phase 'Evaluer'	CP, PS
Mesurer l' adoption	Canevas d'adoption	CP, PS
	Questionnaire individuel de suivi	CP, PS
	Fiche de suivi de l'utilisation	CP, PS

Le protocole d'intégration et les outils sont mis à jour en fonction du développement des solutions intégrées (modifications des fonctions, évolutions éventuelles pour l'opérateur et la situation de travail).

4 Quelques exemples concrets d'application

4.1 Adaptations pour favoriser l'intégration de l'exosquelette (Cas d'usage n°1, Bénéteau).



Dans une majorité des projets d'intégration entre 2017 et 2019, une phase de réflexion sur l'adaptation de la situation de travail a été nécessaire. Cela concernait par exemple des modifications sur les processus de travail, l'accès aux outils, l'accès à l'exosquelette, les modalités de suivi de son utilisation... Ces retours d'expériences nous ont permis de compléter le modèle d'acceptation présenté dans l'article IISE (Chapitre 4) avec les dimensions 'compatibilité aux équipements existants' par exemple. Nous présentons ci-après quelques exemples de ces adaptations qui ont été prototypées (nommées aussi artefacts) dont le succès conditionne l'usage futur du dispositif chez ce partenaire.

- Prototypage d'une accroche pour la fixation d'un équipement de protection individuel : un strap est accroché sur la structure de l'exosquelette. L'opérateur vient scratcher son ventilateur directement sur l'exosquelette. L'assemblage ne doit pas gêner le mécanisme de l'exosquelette.
- Prototypage d'un porte-outil à hauteur des épaules sur la rampe pour stocker des disques de ponçage. L'opérateur doit faire un effort pour baisser les bras et changer le disque de ponçage lorsqu'il porte l'exosquelette. Grâce à cette adaptation, il force moins pour atteindre les disques situés au niveau de ces épaules et n'a pas besoin de descendre de la rampe.
- Aménagement de l'espace de travail : facilitation de l'accessibilité à l'exosquelette. Une armoire aux façades transparentes est disposée de manière à ce que l'opérateur puisse voir si l'exosquelette est disponible. Un disque est disposé à l'extérieur de l'armoire avec un code couleur pour indiquer si l'exosquelette est bien disponible et en état de fonctionnement.

La Figure 65 représente le principe des adaptations de la situation de travail pour l'intégration de l'exosquelette qui ont été prototypées.

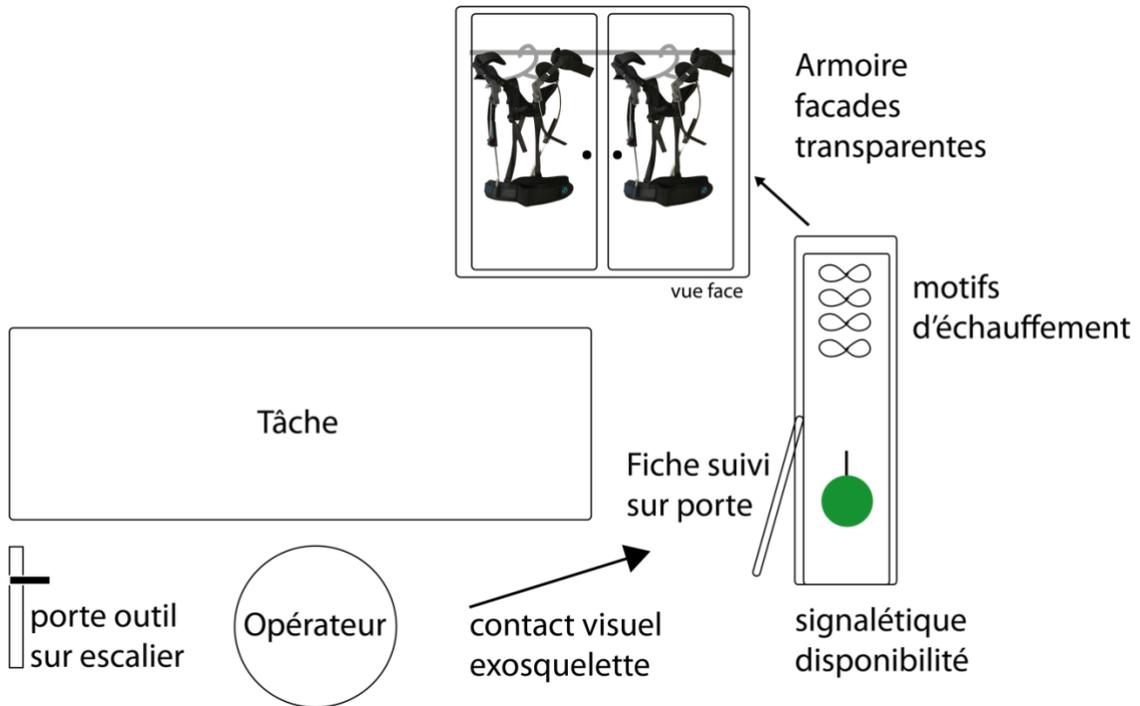
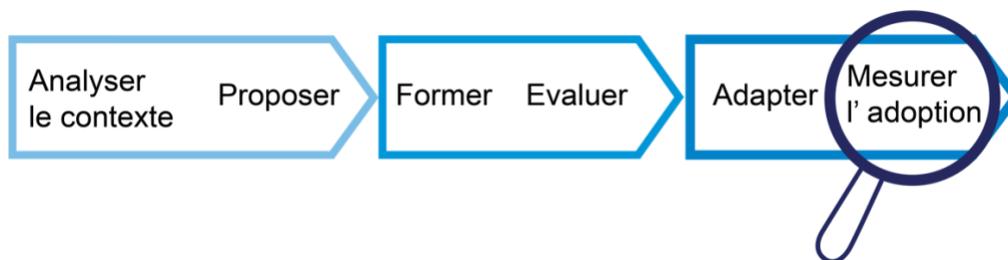


Figure 65. Schéma de principe des adaptations du poste de travail pour faciliter l'intégration de l'exosquelette.

4.2 Mesurer l'adoption de l'exosquelette (cas d'usage n°2, Airbus Nantes).



Cette dernière phase a pour objectif d'accompagner notre partenaire dans la mesure de l'adoption de l'exosquelette. Or le questionnaire d'évaluation individuel proposé dans les étapes précédentes est mal adapté à cette phase. Il a été jugé trop long à compléter, n'interroge pas le

suivi de l'utilisation et ne permet pas l'organisation de l'implémentation de la solution. A ce stade, le besoin de notre partenaire est plutôt de mettre en place des métriques de suivi simples pour mesurer l'utilisation et l'adoption du dispositif, et de bien organiser les remontées d'informations. Nous avons donc proposé un nouvel outil inspiré de l'outil HEART (Rodden et al., 2010) utilisé à l'origine pour la mesure de l'expérience utilisateur, en associant des métriques à des objectifs d'utilisation. Ce canevas (ou grille) permet dans notre contexte de clarifier les métriques déterminantes pour l'adoption de l'exosquelette (Table 13). Il fait le lien entre les chefs d'atelier, les responsables de projet et les opérateurs. Cet outil est retenu, mais il n'est pas appliqué pour le moment. Il sera proposé en vue de la création d'une plateforme technique dédiée aux systèmes d'assistance au sein cette organisation.

Table 13. canevas d'adoption développé pour Airbus, Nantes, juillet 2019.

Canevas d'adoption

	OBJECTIFS	SIGNAUX	METRIQUES
Satisfaction globale	Les opérateurs formés sont satisfaits	Questionnaire de suivi individuel Scores > 6	'Satisfaction globale'/ facilité d'utilisation, Confort....Likert(0-10)
Engagement	Utilisation sur tâches ciblées par l'assistance	Nombre et temps d'utilisation/personne Questionnaire de suivi individuel Ex : Nb> 5, temps > 10h (défini avec l'entreprise)	Fiche suivi solution (nb et temps d'utilisation) Questionnaire de suivi individuel 'volonté d'utilisation' Likert (0-10)
Adoption	Les opérateurs utilisent régulièrement la solution	Jours utilisés > 50% ou : 1 fois sur 2.	Pourcentage de jours utilisés par rapport aux jours travaillés
Rétention	Les opérateurs continuent d'utiliser la solution	Fréquence d'utilisation/individu Scores questionnaires < 5 Les documents ne sont pas remplis	Nombre de retour de la solution en maintenance, plaintes. Questionnaire suivi individuel, fiche solution
Réalisations	Les tâches sont réalisées avec succès avec l'exosquelette	Efficacité reconnue, travail effectué avec la même qualité.	SAV (nombre de retour en réparation) Questionnaire de suivi individuel 'qualité' Likert (0-10)

Cette liste d'exemples d'applications industrielles n'est pas exhaustive. Ces retours d'expériences permettent d'avancer sur la création de repères méthodologiques et sont partagés sur une plateforme en ligne avec le groupe AFNOR.

4.3 Transfert de l'approche sur une autre technologie

Ce paragraphe concerne une expérimentation secondaire, en parallèle de l'expérimentation présentée dans l'article IISE. Nous avons voulu confronter l'approche développée pour l'étude

de l'acceptation de l'exosquelette à un robot collaboratif (cobot), sur le cas d'usage Bénéteau (opérations de finitions de coques de bateau). Cette petite étude complémentaire a été réalisée avec les mêmes objectifs (mais temps un temps beaucoup plus court), à savoir :

- Identifier les facteurs d'acceptation du système Humain-Machine,
- Proposer des méthodes de mesures des facteurs simples et rapides, sans perturber l'activité,
- Sur les bases des informations acquises, proposer un protocole global d'intégration et des outils supports (questionnaires...).

Les résultats ont été communiqués lors de la conférence IROS 2018, Madrid, Espagne (Moyon et al., 2018). La publication est ajoutée en annexe ([Annexe 3](#)). Parmi les points d'intérêt de ce transfert méthodologique, nous pouvons évoquer l'identification de l'aspect physique comme un aspect important, à contre-courant de ce qui était imaginé, car nous comptons sur un mode d'interaction à distance (téléopération) majoritaire. En effet, des problèmes importants de maniabilité (frottement des axes du cobot), de préhension (manque et position des poignées) et de manœuvrabilité (plateforme mobile) ont pu être mis en évidence grâce aux observations et interviews. Concernant les aspects cognitifs, les questionnaires ont notamment révélé un manque d'utilisabilité de l'interface qui était mal comprise.

Nous pouvons citer plus précisément l'apport de ces outils méthodologiques :

- Situation initiale : les sessions d'**observation** et d'analyse de l'activité (tâche commentée) nous ont permis de comprendre le savoir-faire demandé aux opérateurs puis de caractériser **des facteurs d'acceptation** pouvant être déterminants dans l'adoption de la solution technique.
- Situation simulée : le principe de **simulation des usages**, la prise en compte des contraintes réelles de la situation de travail avec les variabilités individuelles, les différences entre travail prescrit et réel et les aléas potentiels de la production ont permis de **mettre en valeur des changements potentiels** liés à l'intégration d'un cobot, autant sur le processus (ordre des opérations) que sur l'interface ou sur l'environnement (accès aux outils, manœuvrabilité du cobot.). La Figure 66 montre un croquis de recherche de la future interface : sélectionner la zone de travail directement sur la coque du bateau (à gauche) et la zone de travail par un motif reconnaissable (à droite) semble plus pertinent pour interagir avec l'opérateur, selon un des principes

d'utilisabilité des interfaces (Bastien & Scapin, 2004) qui suggère d'utiliser des représentations connues par les futurs utilisateurs.

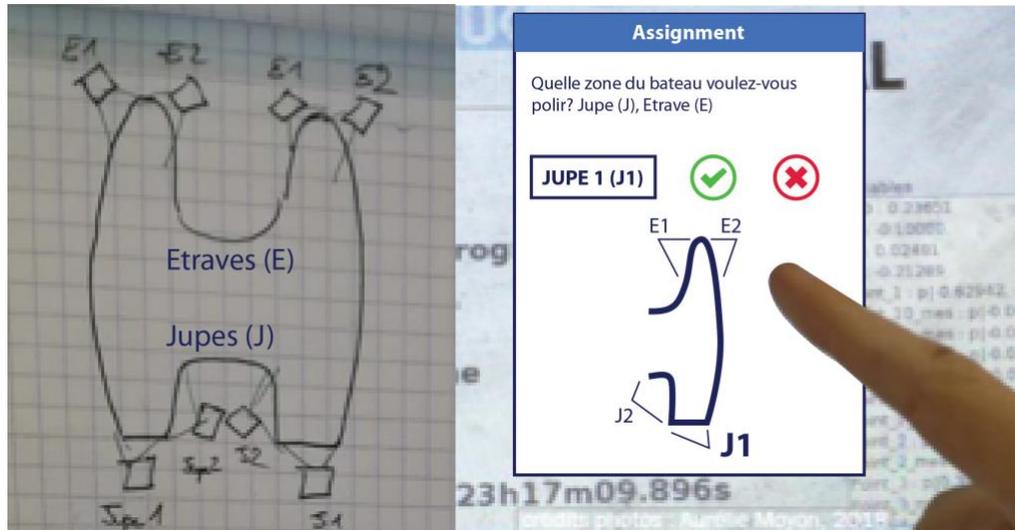


Figure 66. Représentation du travail de recherche pour l'interface du cobot mobile. D'après les tests utilisateurs, la sélection par deux points est trop complexe. Elle est remplacée par des zones et motifs facilement reconnaissables par les opérateurs. La jupe est la partie arrière de la coque.

Concernant les limites de l'application de cette approche appliquée à un cobot, il existe bien sûr d'autres approches méthodologiques en conception. Une approche récente développée pour la robotique industrielle et basée sur les fondements de l'ergonomie cognitive est appelée la *cognitive* (Moulières-Seban et al., 2017). Il serait intéressant d'étudier si les éléments de cette méthode apportent de la valeur sur la gestion d'un de nos projets d'intégration.

5 Participation à la naissance d'une norme

Il est difficile de savoir comment évaluer un dispositif innovant qui n'a pas encore été utilisé. En revanche, le travail de normalisation se révèle important et urgent dans un flou réglementaire, car les exosquelettes sont des dispositifs portés sur le corps, qui ne sont ni des équipements de protection individuels ni des dispositifs médicaux. Depuis début 2018, un petit nombre de start-ups ont obtenu une certification médicale sur leur produit. Cependant, la recherche a fait apparaître des effets physiques non négligeables (Theurel et al., 2018) comme une sollicitation importante des muscles antagonistes. Cet aspect souligne l'importance de normaliser sur l'ergonomie de l'interaction Humain-Exosquelette. Dans ce cadre, L'AFNOR a proposé à un certain nombre d'entreprises (du secteur industriel et logistique) et d'experts d'échanger sur cette thématique, comme base d'une future norme de l'ergonomie Humain-Exosquelette (NFX35A). Nous avons activement fait partie de ce groupe depuis fin 2017 en participant aux réunions et en partageant notre travail.

5.1 Travail descriptif complémentaire au travail normatif

Le processus de création d'une norme est complexe et long, surtout s'il s'agit de normaliser des systèmes innovants, car les connaissances et l'expérience nécessaires à la production de règles de référence sont insuffisantes. Ce travail normatif ne peut donc se faire sans l'expérience des situations réelles, c'est-à-dire un travail descriptif.

Le but de ce groupe de travail est donc de construire une connaissance commune à travers différents champs d'applications des exosquelettes, des modèles testés, des protocoles de tests etc. En tant qu'intégrateur et à travers le travail de thèse, notre rôle a été de participer à l'élaboration d'un travail descriptif et de modélisation de l'interaction Humain-Exosquelette, de partager notre expérience de terrain, les méthodes que nous avons expérimenté et les résultats obtenus.

5.2 Partage des méthodes et outils :

Tous les deux mois environ, le groupe de travail se réunit lors d'une demi-journée, sur le site d'un des membres. Les réunions peuvent être suivies à distance. Chaque réunion est organisée dans le but de partager les bonnes pratiques, les difficultés et inquiétudes liées à l'intégration des exosquelettes. La transdisciplinarité au sein du réseau d'acteurs (ergonomes, ingénieurs, industriels, laboratoires...) permet d'échanger sur les méthodes

employées et les protocoles mis en place. Le réseau peut être sollicité pour expérimenter, discuter et valider de 'pair à pair' un nouvel outil proposé. Nos protocoles expérimentaux, les résultats et la démarche d'intégration incluant les outils-repères pourront être partagés. Une plateforme virtuelle de partage est prévue à cet effet. L'échelle HEFL suscite un intérêt particulier pour aider à cadrer le déploiement des exosquelettes qui pourrait s'accélérer prochainement. Ce type d'échelle permettrait de rapidement garantir un usage sécuritaire de l'exosquelette avec des métriques facilement observables (contrôle des ajustements, temps d'installation...). Des discussions avec des chercheurs ont été engagées et pourront donner lieu à d'éventuelles collaborations.

6 Éthique et responsabilités des entreprises

L'intégration des exosquelettes en entreprise pose certaines problématiques éthiques à considérer. Tout d'abord, l'exosquelette interroge la performance de l'opérateur et la préservation de son savoir-faire. On peut aussi imaginer des dérives possibles de son utilisation. En parallèle d'un cadre normatif en construction, des réponses seront à apporter par l'éthique afin de préserver l'humain au travail. Durant le travail de thèse, nous avons été confrontés à certaines de ces problématiques qui questionnent les limites du déploiement des exosquelettes.

6.1 Humain préservé vs homme augmenté

Les médias, et même les services de communication de nos partenaires, utilisent en général un vocabulaire vendeur, ciblé sur l'Homme 'augmenté'. Cependant, nous avons pu voir notamment à travers nos expérimentations qu'il ne s'agit pas d'augmenter la force de l'opérateur, qui est le seul producteur d'énergie (pour les systèmes passifs) mais de soulager son effort physique, sans effort de concentration supplémentaire. Pour cette raison nous préférons parler de 'l'humain 'préservé'. Par conséquent et en tant qu'acteurs du commerce de ses dispositifs nous nous sommes engagés dans le respect des principes suivants :

- Sensibilisation à la prévention des risques liés à l'utilisation des exosquelettes,
- Formations adaptées à la situation de travail, prise en compte du temps de familiarisation nécessaire qui doit intégrer un niveau suffisant de connaissance (principes de sécurité...) et de pratique (ajustement, perception des limites et changements dans les mouvements.),
- Favorisation de la diversité des opérateurs (genre, âge),

- Mise en place de métriques non basées sur la performance temporelle (temps de l'opération) mais sur la préservation de l'opérateur (suivi individuel, nombre d'arrêts de travail),
- Orientation sur les solutions les moins contraignantes pour la réalisation du geste technique.

6.2 L'exosquelette reste un palliatif

Même si nous avons montré qu'il pouvait y avoir des effets positifs du port de l'exosquelette (article CIRP, HFES et AE) lors de la réalisation de tâches techniques, la situation de travail reste pénible. Il semble important de considérer en effet que la situation adaptée n'est pas forcément une situation optimale, puisque la posture du départ n'est pas modifiée. Les risques liés au maintien de la posture pénible restent donc présents même s'ils sont diminués. L'exosquelette reste donc un 'palliatif' pour soulager des situations à éviter. Il est important de souligner qu'une adaptation du poste doit être évaluée en priorité de l'intégration d'un dispositif d'assistance physique, dont on ne connaît encore pas les effets à long terme. La règle de l'adaptation du travail à l'homme doit rester prioritaire.

L'exosquelette représente une solution très attendue pour réduire les coûts liés aux TMS dans les entreprises. Or le lien entre l'utilisation d'un exosquelette et la réduction effective totale des TMS, c'est-à-dire, la réduction sans le déplacement des troubles, n'est pas encore établie. Il faut donc être vigilant sur les effets à long terme de ces dispositifs sur les modifications biomécaniques ou physiologiques. Une étude de l'INRS (Theurel et al., 2018) a révélé que si l'exosquelette pouvait globalement réduire la sollicitation de certains muscles, il pouvait également induire la sollicitation de muscles antagonistes. Cette étude invite à la prudence afin de considérer l'intégration de l'exosquelette au cas par cas, et à prendre en compte les forces externes appliquées au système (comme le poids des outils) qui peuvent empêcher une utilisation optimale de l'assistance.

8 Conclusion

Ce dernier chapitre a présenté les apports de la thèse pour l'entreprise au travers d'exemples concrets. La nature de ces apports est essentiellement méthodologique et expérimentale. Les résultats expérimentaux de l'étude des effets du port de l'exosquelette et de son acceptation ont permis à Europe Technologies de monter en expertise. Un protocole d'intégration basé sur les acquis des résultats présentés a été commenté. Quelques exemples ont été détaillés pour commenter les apports méthodologiques du protocole. Les

limites de l'approche ont été commentées, il reste à démontrer l'apport de cette approche sur d'autres exosquelettes dans d'autres cas d'application industriels. Plus globalement, une approche centrée utilisateur a permis d'enrichir la méthode de conception des systèmes en entreprise et a servi de support au constructeur *SkelEx* pour l'optimisation de ces prototypes d'exosquelettes. Nos retours d'expériences alimentent un travail de groupe sur la normalisation de l'interaction Humain-Exosquelette actuellement en cours. Certaines questions d'éthique ont été soulevées et quelques principes associés ont été présentés dans le but de fournir une intégration responsable des solutions pour le bien des opérateurs. Nous allons conclure d'une manière plus générale sur le travail de recherche pour l'intégration des exosquelettes en entreprise.

Conclusion générale

Dans le contexte de l'apparition des exosquelettes dans l'industrie afin de soulager la pénibilité au travail, la recherche des effets du port de l'exosquelette sur la performance de l'opérateur ainsi que les conditions de son acceptation doivent être envisagées. Ainsi, les objectifs principaux de cette thèse étaient de rechercher les effets du port de l'exosquelette sur des situations de travail industrielles et d'identifier les facteurs d'acceptation liée à son utilisation. Plus précisément, les objectifs d'applications pour l'entreprise étaient d'investiguer les effets du port d'un exosquelette passif du haut du corps, de mieux comprendre les besoins des utilisateurs finaux ainsi que d'établir des règles et outils repères pour une meilleure intégration des exosquelettes dans différents secteurs industriels.

Un positionnement scientifique transversal entre les sciences de l'ergonomie et de la conception a été proposé et la gestion du projet de recherche a été guidée par une méthodologie centrée sur l'utilisateur. À travers cette méthodologie générale, la recherche des facteurs d'acceptation et des effets du port de l'exosquelette formait la partie centrale de la démarche.

Concernant **les limites et perspectives des effets objectifs du port de l'exosquelette**, nous avons confirmé l'effet positif de l'exosquelette sur la sollicitation cardiaque, la performance et le nombre d'erreurs mais aussi mis en valeurs certains points de vigilance, notamment sur la notion de transfert des efforts locaux ainsi qu'un temps d'installation trop long selon les critères de l'entreprise (supérieur à 3 minutes) lorsque les participants ont un faible niveau de familiarisation. Cependant, ces résultats sont incomplets par rapport à la totalité des méthodes de mesures objectives expérimentées.

Les résultats de l'analyse de la sollicitation musculaire (Électromyogramme de surface) n'ont pas pu être interprétés à cause des artefacts trop nombreux sur les signaux qui rendent l'interprétation difficile. Une augmentation de la sollicitation de certains muscles lors des opérations sous le niveau des épaules pourrait être attendue car ce système passif non

ajustable oblige en effet les utilisateurs à forcer vers le bas pour descendre les bras. Ce manque de flexibilité est une limite actuelle de la technologie.

Cette méthode d'analyse en surface a une limite importante : les capteurs EMG ont tendance à se déplacer car ils sont en contact avec l'exosquelette. Une des pistes d'amélioration est la compatibilité des capteurs avec les points de contact entre le corps humain et l'exosquelette.

Concernant l'analyse de la cardiofréquencemétrie, nous aurions pu systématiquement faire des enregistrements de la journée de travail entière pour avoir une vision plus globale. Les mesures pourraient être répétées en phase d'utilisation pour confirmer une réduction de la pénibilité globale puisqu'en effet, l'évolution du rythme cardiaque est sensible à de nombreux facteurs qui peuvent varier en fonction de l'état individuel des participants (stress, fatigue...). Des enregistrements plus longs sont prévus pour mesurer l'évolution à plus long terme.

De plus, certaines mesures pourraient être étudiées plus en détail. Par exemple, l'analyse des mouvements aurait pu nous renseigner sur la manière dont les utilisateurs s'adaptent à l'exosquelette en termes d'accélération, précisément dans la direction de la contrainte mécanique donnée par les ressorts. Cependant, une instrumentation non gênante pour les gestes et pour les points d'appuis avec l'exosquelette est nécessaire. Certains critères individuels n'ont pas été exploités dans l'analyse des résultats comme la variabilité morphologique des participants ou leur genre. Plus de mesures objectives restent à être étudiées, en relation avec des mesures perceptives.

À propos de **l'acceptation du dispositif et de la familiarisation des opérateurs**, nous avons démontré que les approches traditionnelles sur l'étude de l'acceptation n'étaient pas adaptées à notre contexte et avons proposé une approche basée sur l'étude en situation réelle comme la littérature récente le suggère. Ces expérimentations nous ont permis d'identifier et de mesurer les facteurs d'acceptation propres à nos cas d'usage industriels et de confirmer l'importance d'une phase de familiarisation pouvant influencer positivement ou négativement la performance de l'opérateur et son acceptation. Aujourd'hui, les facteurs d'acceptation ne sont pas toujours pris en considération sur la situation de travail (adaptabilité aux équipements, performance perçue...) et peuvent provoquer l'abandon de l'utilisation des exosquelettes. Cet abandon est une mauvaise image pour Europe Technologies et doit être évité à tout prix. L'intérêt de ces travaux reste donc actuelle, cependant, ils comportent certaines limites. En effet, les critères d'évaluation pouvant

dépendre des modèles d'exosquelettes (fonctionnement de l'assistance, parties du corps...), des tâches réalisées et des performances attendues, il serait donc difficile de généraliser un seul questionnaire pour tous les exosquelettes. Une forme de généralisation de pair-à-pair est en cours à mesure des nouvelles intégrations chez nos partenaires et des réunions avec le groupe de travail AFNOR. Le modèle d'acceptation ainsi que le questionnaire proposé ont été utilisés dans une dizaine d'entreprises. L'INRS travaillant également sur un questionnaire, un travail de comparaison des dimensions interrogées pourrait être réalisé.

Concernant **le protocole d'intégration**, la proposition est bien accueillie par nos partenaires industriels. En effet, le manque de connaissances toujours actuel sur les effets précis de l'exosquelette, son rôle dans la réduction des TMS et les facteurs de son acceptation peuvent toujours provoquer l'arrêt d'un projet d'intégration. Certains partenaires ont par exemple découvert trop tard le manque d'ajustabilité des systèmes passifs, qui peuvent demander une adaptation du poste ou du processus. Des étapes d'évaluation de la solution et des adaptations restent donc souvent nécessaires et justifient l'application du protocole que nous proposons. Cependant ce protocole se confronte à certaines limites :

- **Des compétences et coûts importants** : même si nous avons appliqué les méthodes de mesures les plus simples et les plus accessibles possible, certaines expertises pourraient être mieux acquises en interne (analyses EMG par exemple). En effet, nous avons eu la chance de pouvoir compter sur les ressources de nos partenaires (ergonome, infirmier) pour valider les protocoles et outils employés, ce qui ne sera pas toujours le cas pour les plus petites structures. De plus, la gestion de ce protocole exige du temps et de l'expertise : les modèles d'exosquelettes peuvent évoluer rapidement (avec par exemple quatre modèles *SkelEx* en 2019). Un temps important peut donc être nécessaire pour mettre à jour la connaissance des fonctionnalités et des réglages qui doivent être pris en compte dans les supports de familiarisation et la stratégie commerciale. Enfin, même si les organisations de la santé au travail (CARSAT) préconisent l'évaluation systématique des solutions d'assistance, les petites et moyennes entreprises sont confrontées à un coût important des études proposées par les laboratoires externes.
- **Un modèle de collaboration en construction** : à ces limites s'ajoutent des difficultés organisationnelles et humaines : les entreprises n'ont pas toujours intégré de préventeur au sein de l'organisation, les responsabilités sont mal définies pour

appliquer les étapes essentielles du protocole, l'accès au matériel de test est parfois conditionné par des autorisations longues à obtenir. De plus, l'application du protocole a révélé la nécessité de la prise en compte des facteurs organisationnels tels que : la politique de prévention de l'entreprise, les méthodes/processus d'assistance, les organisations de représentation du personnel comme le CHSCT (Comité d'Hygiène, de Santé et Sécurité et des conditions de Travail). Pour proposer, adapter et suivre l'intégration, il est nécessaire de travailler avec des acteurs de différents niveaux hiérarchiques, qui doivent clairement délimiter leurs missions dans ce nouveau type de projet. L'ensemble de ces difficultés encourage les entreprises à simplifier leur protocole de test et/ou faire appel à un laboratoire externe lorsqu'elles le peuvent. Par conséquent, la gestion d'un projet d'intégration des solutions d'assistance demande des ressources importantes. Cet accompagnement à l'intégration pourrait aussi être développé directement par les constructeurs, mais un acteur local serait sûrement nécessaire pour étudier les besoins en situation réelle. Une dernière possibilité qui commence à être évoquée chez les grands groupes serait le développement d'une plateforme technique et scientifique qui mutualiserait des ressources spécifiques aux systèmes d'assistance avec des acteurs internes et externes (laboratoires indépendant, bureaux d'étude...) mobilisables en fonction des projets.

Sur une conclusion plus personnelle, cette recherche constitue une **première brique dans la compréhension et l'évaluation de l'interaction Humain-Exosquelette et des facteurs humains favorisant leur intégration en entreprise**. Beaucoup d'études restent à faire, notamment pour pouvoir généraliser notre approche. Nous devons continuer de tisser les connaissances avec nos partenaires et tous les autres acteurs concernés par l'assistance à l'opérateur afin de contribuer efficacement à une expérience satisfaisante des utilisateurs. En prenant du recul sur ce travail de thèse qui aura été semé d'embûches matérielles, organisationnelles et humaines, nous pouvons dire que :

- L'exosquelette n'est pas une solution complète pour réduire les TMS et la pénibilité au travail, mais peut offrir un soulagement sur la posture spécifique pour laquelle il a été conçu. De plus, il peut réduire la pénibilité globale liée aux tâches industrielles, sans demander un effort de concentration supplémentaire important, sans gêner la réalisation des gestes techniques et en respectant les standards de qualité,

- Ces bénéfices peuvent être conditionnés par une phase de familiarisation indispensable. La conception d'un protocole conçu spécifiquement pour atteindre un certain niveau de connaissances et de pratique en un minimum de temps est pertinente, mais elle demande d'investir du temps pour une mise à jour continue.
- Lorsque le besoin est bien identifié, les opérateurs bien formés et l'organisation du suivi bien définie, l'intégration de ces dispositifs devrait être encouragée. Un protocole d'intégration est pertinent pour favoriser le bon déroulement de ces étapes entre tous les acteurs,
- L'approche centrée sur les utilisateurs étaient bien adaptée pour la conception du projet d'intégration. Notamment à travers les principes de recherche participative impliquant les opérateurs et les simulations d'usage qui ont facilité les prises en compte des besoins et l'évaluation des solutions.

Dans ce contexte nouveau **pour l'entreprise**, la connaissance des effets du port de l'exosquelette et de son acceptation ainsi que la production d'un protocole d'intégration pour les praticiens **constituent un avantage concurrentiel fort**. Cette expertise pourra être utilisée dans le cadre de la **personnalisation des protocoles d'intégration des différents partenaires** qui nous sollicitent dans ce sens.

Dans la continuité des travaux, les connaissances acquises seront intégrées en Recherche et Développement chez Europe Technologies pour d'autres études sur l'évaluation et la conception de solutions d'assistance (cobotique, IHM...) où **l'approche centrée sur l'utilisateur est un atout de différenciation**. Ces travaux nécessiteront de maintenir une collaboration avec le milieu académique et différentes équipes de recherche dans le but d'imaginer les solutions interdisciplinaires adaptées à l'humain.

Production scientifique

Articles de revue

- Moyon, A., Petiot, J.F., Poirson, E., (2019). *Development of an Acceptance Model for Occupational Exoskeletons and Application for a Passive Upper Limb Device*. ISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 1-11. 10.1080/24725838.2019.1662516

Soumission à une revue

- Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F. (soumise en Mai 2020). Studying in real situation the effects of a passive exoskeleton and a familiarization method during industrial task: assessment of global physical workload, user performance, perceived benefits and acceptance. *Applied Ergonomics*.

Publications et communications avec actes

- **Annual conference of Human Factors and Ergonomics Society (HFES 2019)**. Nantes, France. *Procedia HFES*. Investigating the effects of passive exoskeletons and familiarization protocols on arms-elevated tasks. Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F.
- **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018)**. Madrid, Spain. *Procedia IROS*. *Acceptation criteria of a movable cobot for polishing activities in naval industries*. Aurélie Moyon, Kévin Subrin, Benoit Furet. (hal-01991638).
- **CIRP Design Conference (CIRP 2018)**. Nantes, France. *Procedia CIRP*, 70, 284-289. *Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations* Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F.

Conférences et communications

- **53e Congrès de la Société d'ergonomie de langue française (SELF 2018)** Bordeaux, France : « Intégration d'un exosquelette : retour d'expérience terrain et proposition d'une méthodologie de caractérisation de l'interaction Humain-Exosquelette basée sur l'acceptation »
- **Journées de l'École doctorale des Sciences physiques et de l'ingénieur (ED SPI 2018, 2019)**, Nantes, France : Présentation des travaux de recherche.
- **Séminaires équipe de recherche PACCE et ROMAS** : Présentation des travaux de recherche. Échanges thématiques.
- **Communications au sein du groupe Bénéteau** : coordination du groupe projet, rédaction des protocoles de tests, présentation des résultats, rédaction des recommandations.
- **Communications au sein d'Airbus** : coordination du groupe projet, présentation des résultats, rédaction des protocoles de tests.

Participations

Groupe de travail AFNOR pour la future norme NFX35-A 'Ergonomie de l'Interaction Humain-Exosquelette'.

- Réunion du groupe tous les 2 mois environ depuis décembre 2017 (participation aux échanges sur les méthodes de mesure, protocoles de tests, retours d'expérience terrain).

Visites des sites industriels et laboratoires :

- INRS (Vandœuvre Les Nancy, 2018)
- Groupe PSA (Vélizy, 2018)
- Usine PSA (Vigo, Espagne 2018)
- Laboratoire MIP du STAPS (Nantes, 2018)

Encadrement d'étudiants

- Interaction Humain-Machine : concevoir avec les utilisateurs, cas industriels. IMT Atlantique, Mars 2020.

- Digital School, Ecole Centrale de Nantes (2018, 2019). Introduction au Design Thinking et à la mesure de l'expérience utilisateur.
- Cours 'Usages', Ecole Centrale de Nantes (2019). Conception centrée utilisateur.
- Encadrement d'un stagiaire pendant 2 mois (2019).
- Workshop, Conception centrée utilisateur d'un handivélo (2018).
- Workshop, Conception centrée utilisateur d'une desserte médicale pour le service des urgences de Lorient (2018).
- Workshop, Utilisabilité d'un cobot XXL, IUT de Nantes (2018).
- Workshop, Conception d'artefacts pour l'ergonomie des exosquelettes (2017).

Contributions techniques

- Développement d'un protocole d'intégration pour un exosquelette : Outils-supports, rédaction des différents éléments du protocole (déroulé/méthodes, supports et contenu de formation, questionnaires et échelles de mesure).
- Notes techniques pour la protection des contributions méthodologiques (Carnet de laboratoire).
- Modèle COPA pour l'acceptation de l'exosquelette professionnel.
- Échelle de mesure 'connaissances/pratiques' (HFEL)
- Grille de mesure de l'expérience utilisateur (Canevas d'adoption)

Développement d'un exosquelette actif :

- Cahiers des charges du prototype, schémas directeurs des solutions.
- Développement de solutions de vérins souples et mesures de performance.
- Études ergonomiques : analyse de l'activité pour 6 clients, définition des protocoles de tests, conduite des tests terrain, rapports d'évaluation, recommandations en conception.
- Notes techniques pour la protection des concepts mécaniques, mécatroniques et interface utilisateur (carnet de laboratoire).
- Développement de solutions de vérins textiles pour la conception d'un exosquelette actif

Développement d'un cobot mobile :

- Analyse de l'activité, rédaction des questionnaires, observations et interviews, campagne de tests, rapport d'étude (recommandations pour l'ergonomie produit et IHM, description des concepts).

Divers travaux en recherche et développement :

- Organisation de design sprints et preuves de concepts pour différents projets d'assistance à l'opérateur : logiciel de diagnostic d'outillage, chariot mobile, prothèse de bras, cobot de soudage...
- Rapports pour la protection intellectuelle.
- Rédaction de dossiers pour appels à projet.
- Rédaction des rapports crédit impôt recherche pour la thèse.

Bibliographie générale

A

Akrich, M. (1989). *La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques*. *Anthropologie et Sociétés*, 13, 31-54. <https://doi.org/10.7202/015076ar>.

Argyris, C., & Schön, D. (1991). *Participatory Action Research and Action Science Compared: A Commentary*. In W. Whyte, *Participatory Action Research* (p. 85-96). SAGE Publications, Inc. <https://doi.org/10.4135/9781412985383.n6>.

B

Baltrusch, S.J., van Dieën, J. W., van Bennekom, C.A.M., & Houdijk, W. (2018). The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied Ergonomics*, 72, 94-106. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.007>.

Bastien, J.M.C., & Scapin, D. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & Information Technology*, 16, 220-231. <https://doi.org/10.1080/014492997119806>.

Bastien, J.M.C., & Scapin, D. (2004). La conception de logiciels interactifs centrée sur l'utilisateur : Étapes et méthodes. In *Ergonomie*, 27, 451-462. Presses Universitaires de France; Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0451>.

Baumard, C. (2017, Mai, 19). *Exosquelettes : Le Marché De l'Homme Augmenté Est En Pleine Expansion*. *Technologie*. Forbes. <https://acceptable.forbes.fr/technologie/exosquelettes-le-marche-de-lhomme-augmente-est-en-pleine-expansion/>.

Benders, J., Haan, J. de, & Bennett, D. (1995). *The symbiosis of work and technology*. Taylor & Francis.

Bengts, M.K. (2004). *Usability as a constituent of end-user computing satisfaction* [Master's Thesis, University of Jyväskylä].

Billings, C. (1996). *Aviation Automation : The Search for A Human-centered Approach*. Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates. <https://acceptable.taylorfrancis.com/books/9781351464932>.

Bionics. (2019, 30 Octobre). <https://eksobionics.com/eksoworks/eksovest/>.

- Bioservo. (2019, 30 Octobre). *Ironhand*. <https://acceptable.bioservo.com/professional/ironhand>.
- Blanchais, W., Coyer De Brunélis, T., & T'KNT De Roodenbeke, G.T. (2018, octobre). *Stake of the digital transformation in the fields of 'products safety' and 'human factors engineering*. Congrès Lambda Mu 21. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02074540>.
- Bobillier-Chaumon, M.-E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : Premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations*, 22, 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001>.
- Borg, G.A (1970). Perceived exertion as an indicator of somatic stress. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 2, 92-98.
- Borg, G.A (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 377-381.
- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 54, 212-217.c
- Boudet, G., Dutheil, F., Chamoux, F. (2014) Le coût cardiaque physiologique : un indicateur objectif de pénibilité valide, *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, Volume 75, Issue 3, p9, ISSN 1775-8785.
- Bourassa, M. (2007). *Les outils de la recherche participative*. 252. Volume XXXV :2. Éditions ACELF.
- Bourgeois, F., & Hubault, F. (2005). Prévenir les TMS : De la biomécanique à la revalorisation du travail, l'analyse du geste dans toutes ses dimensions. *Activites*, 02. <https://doi.org/10.4000/activites.1561>.
- Boy, G.A. (2011). *The handbook of human-machine interaction: A human-centered design approach*. Florida Institute of Technology, USA, Florida Institute for Human and Machine Cognition, and NASA Kennedy Space Center, USA, ISBN: 978-0-7546-7580-8, 2011.
- Brangier, É., Hammes-Adelé, S., & Bastien, J.-M.C. (2010). Analyse critique des approches de l'acceptation des technologies : De l'utilisabilité à la symbiose humain-technologie-organisation. *European Review of Applied Psychology*, 60, 129-146. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2009.11.002>
- Brooke, J. (1996). *SUS - A quick and dirty usability scale*. Taylor and Francis., 8.

C

- Consumer Electronic Show. (2019). *Rehabilitation exoskeleton*. Jacob Rosen. CES 2019. Las Vegas, USA.
- Carroll, J. (2004). *Completing Design in Use: Closing the Appropriation Cycle*. 12. ECIS Proceedings. 44. <http://aisel.aisnet.org/ecis2004>.
- CARSAT. Caisse d'Assurance Retraite et de Santé Au Travail. <https://acceptable.carsat-pl.fr/>.
- Cyberdyne. (2019, 30 Novembre). <https://acceptable.cyberdyne.jp/english/>.
- Colgate, J.E., Wannasuphprasit, W., Peshkin, M. (1996) *Cobots: Robots for Collaboration with Human Operator*. Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, Vol. 5, (8), 433–440.
- Coutaz, J. (1990). *Interfaces homme-ordinateur : conception et réalisation*. Dunod, Paris.
- Cummins, R.A., & Gullone, E. (2000). *Why we should not use 5-point Likert scales: The case for subjective quality of life measurement*. Proceedings, Second International Conference on Quality of Life in Cities (pp.74-93). Singapore: National University of Singapore.
- Cyberdyne. (2019, 30 Novembre). <https://acceptable.cyberdyne.jp/english/>.

D

- Dan Kara. (Mai 2016). *Robotics and intelligent systems* [ABI research]. Présenté à Innorobo, Paris.
- Daniellou, F., & Béguin, P. (2004). 20. Méthodologie de l'action ergonomique : Approches du travail réel. In *Ergonomie* (p. 333-358). Presses Universitaires de France, Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0333>.
- Darses, F., & Reuzeau, F. (2004). 24. Participation des utilisateurs à la conception des systèmes et dispositifs de travail. In *Ergonomie* (p. 405-420). Presses Universitaires de France, Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01.0405>

- Darses, F. & de Montmollin, M. (2012). *L'ergonomie*. Paris: La Découverte.
- Davis, F.D. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13, 319. <https://doi.org/10.2307/249008>.
- de Looze, M.P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K.S., & O'Sullivan, L.W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59, 671-681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>.
- De Rosnay, J. (1975). *Le macroscope*. Editions du seuil.
- De Vaujany, F.X. (2006). Pour une théorie de l'appropriation des outils de gestion : Vers un dépassement de l'opposition conception-usage. *Management & Avenir*, 9, 109-126. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/mav.009.0109>.
- de Vries, A., Murphy, M., Könemann, R., Kingma, I., & de Looze, M. (2019). The Amount of Support Provided by a Passive Arm Support Exoskeleton in a Range of Elevated Arm Postures. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7, 311-321. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1669736>.
- Delaval, K., Larroque, D., Ravallec, C., Vaudoux, D. (2017) *Travail & sécurité, Les dispositifs d'assistance physique*. The French National Research and Safety Institute editions (ed. INRS).
- Descatha, A., Roquelaure, W., Chastang, J.-F., Evanoff, B., Melchior, M., Mariot, C., ... Leclerc, A. (2007). Validity of Nordic-style questionnaires in the surveillance of upper-limb work-related musculoskeletal disorders. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 33, 58-65.
- Dourish, P. (2003). The Appropriation of Interactive Technologies : Some Lessons from Placeless Documents. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 12, 465-490. <https://doi.org/10.1023/A:1026149119426>.
- Dunning, K.K., Davis, K.G., Cook, C., Kotowski, S.E., Hamrick, C., Jewell, G. and Lockey, J. (2010), Costs by industry and diagnosis among musculoskeletal claims in a state workers compensation system: 1999–2004. *American Journal of Industrial medicine*, 53: 276-284. doi:10.1002/ajim.20774.

E

Erickson, T. (2000). *Lingua Francas for design: sacred places and pattern languages*. Proceedings of the conference on Designing interactive systems processes, practices, methods, and techniques - DIS '00. Academic Press, New York City.

Ergonomie et prévention en conception des situations de travail—Article de revue—INRS. (Septembre 2018) Consulté sur : <http://acceptable.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202127>.

Ergosanté. (2019, 30 Novembre). Exosquelette Shiva. <https://acceptable.ergosanteweb.fr/exosquelette-fabrique-en-france-ergosante-technologie/420-shiva-exo-exosquelette-france.html>.

Eston, R.G., Williams, JG. (1988) Reliability of ratings of perceived effort regulation of exercise intensity. *British journal of sports medicine*, 22: SSISA, Newlands, 7725, South Africa. 153-5.

EU-OSHA. (2010) OSH in Figures: Work-related Musculoskeletal Disorders in the EU - Facts and Figures. European Agency for Safety and Health at Work.

Exhauss. (2019, 30 Octobre). *Modèle Worker*. http://acceptable.exhauss.com/fr_sxstem.htm.

F

Falzon, P. (2004). *Ergonomie* (1^{re} éd.). Presses Universitaires de France. <https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2004.01>.

G

Gellish, L. (2007) Longitudinal Modeling of the relationship between Age and Maximal Heart Rate. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39:822-9.

Gibson, J.J. (1979). *The Theory of Affordances. The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.

Goodrich, M.A., & Schultz, A.C. (2007). Human-Robot Interaction: A Survey. *Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction*, 1, 203-275. <https://doi.org/10.1561/11000000005>.

Gopura, R.A.R.C., & Kiguchi, K. (2009). Mechanical designs of active upper-limb exoskeleton robots: State-of-the-art and design difficulties. *2009 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 178-187. <https://doi.org/10.1109/ICORR.2009.5209630>.

- Goyette, G., & Hébert-Lessard, M. (2014). *La recherche-action Ses fonctions, ses fondements et son instrumentation*. Les Presses de l'Université du Québec.
- Graham, R.B., Agnew, M.J., & Stevenson, J.M. (2009a). Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task : Assessment of EMG response and user acceptability. *Applied Ergonomics*, 40, 936-942. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.01.006>.
- Grand View Research. (2018). *Exoskeleton Market Size, Analysis & Research, Industry Report*.
- Griffith, D. (2006). Neo-symbiosis : A system design philosophy for diversity and enrichment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36, 1075-1079. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2006.09.008>.
- Grudin, J. (1992). Utility and usability : Research issues and development contexts. *Interacting with Computers*, 4, 209-217. [https://doi.org/10.1016/0953-5438\(92\)90005-Z](https://doi.org/10.1016/0953-5438(92)90005-Z).
- Guerin, F., Laville, A., Daniellou, F., Duraffourg, J., & Kerguelen, A. (1991). *Comprendre le travail pour mieux le transformer*. La pratique de l'ergonomie. Editions ANACT.

H

- Hansen, C., Gosselin, F., Ben Mansour, K., Devos, P., & Marin, F. (2018). Design-validation of a hand exoskeleton using musculoskeletal modeling. *Applied Ergonomics*, 68, 283-288. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.015>.
- General Electric. (1965). *Hardiman, powered Exo-skeleton*. Consulté à l'adresse : <https://acceptable.aivanet.com/2014/01/ges-bringing-good-things-and-massive-robots-to-life/>.
- Hart S.G, Staveland L.E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In: Hancock PA, Meshkati N, editors. *Human Mental Workload*. North-Holland: Elsevier Science Publishers B. V; 1988. pp. 139–183.
- Helms, E., Schraft, R., & Hagele, M. (2002). *rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments*. 399-404.
- Hensel, R., & Keil, M. (2019). Subjective Evaluation of a Passive Industrial Exoskeleton for Lower-back Support : A Field Study in the Automotive Sector. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-9. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1573770>.

- Hetzner, C. (2016). 'Iron Man' suite. Consulté le 30 Mai 2019 sur: <https://acceptable.autonews.com/article/20160626/OEM01/306279965/bmw-workers-don-iron-man-suit>.
- Hill, S.G., Iavecchia, W.P., Byers, J.C., Bittner, A.C., Zaklade, A.L., & Christ, R.E. (1992). Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 34, 429-439. <https://doi.org/10.1177/001872089203400405>.
- Hill, G., Bittner, C., Iavecchia, P., Byers, C., Zaklad, L., Christ, E. (1992) Comparison of Four Subjective Workload Rating Scales. *The Journal of the human factors and ergonomics society*. August 1992.
- Hubault, F. (1995). A quoi sert l'analyse de l'activité en ergonomie ? , Performances Humaines et Techniques, Hors-Série, p.79-85.
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K.S., Graf, E., & O'Sullivan, L.W. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*, 70, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>.
-
- Inbar et al. (1994) Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20- to 70-yr-old men. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26, 538-546.
- Innophys. (Innophys CO, LTD). (2019, 30 Novembre). :<https://innophys.jp/en/product/standard/>.
- INRS. (2011). *Vous avez dit TMS ?* Editions INRS. ED 6094. <http://acceptable.inrs.fr/risques/tms-troubles-musculosquelettiques/ce-qu-il-faut-retenir.html>.
- INRS. (2016). *Ergonomie et prévention en conception des situations de travail*. Consulté le 27 septembre 2016 à l'adresse : <http://acceptable.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202127>.
- INRS. (2017). *Les robots et dispositifs d'assistance physique : Etat des lieux et enjeux pour la prévention*. Editions INRS. ED P2017-120/NS354.
- INRS. (2018). *Méthode d'analyse charge physique de travail*. ED 6161. <http://acceptable.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206161>.
- INRS. (2018). *VIDAR. Une méthode-outil d'aide à la prévention des TMS pour les petites entreprises*. Editions INRS. TF169. <http://acceptable.inrs.fr/media.html?refINRS=TF%20169>.

ISO 16290. (2013). *Définition des Niveaux de Maturité de la Technologie (NMT) et de leurs critères d'évaluation.*

ISO 9241-11. (2018). *Ergonomie de l'interaction humain-système – Partie 11 : Utilisabilité- Définitions et concepts.*

ISO 9241-210. (2019). *Ergonomie de l'interaction homme-système- Partie 210 : conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs.*

ISO/IEC 60601-1-6. (2010). *Exigences générales pour la sécurité de base et les performances essentielles – Norme collatérale: Aptitude à l'utilisation.*

ISO/IEC 62366. (2015). *Dispositifs médicaux – Application de l'ingénierie de l'aptitude à l'utilisation aux dispositifs médicaux.*

J

Jalient, P. (1989). *SADT un Langage pour Communiquer.* Eyrolles.

K

Karhu, O., Kansj, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry : A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8, 199-201. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8).

Karsenty, L., & Brézillon, P.J. (1995). Cooperative problem solving and explanation. *Expert Systems with Applications*, 8, 445-462. [https://doi.org/10.1016/0957-4174\(94\)E0035-S](https://doi.org/10.1016/0957-4174(94)E0035-S).

Kim, S., & Nussbaum, M.A. (2019). A Follow-Up Study of the Effects of An Arm Support Exoskeleton on Physical Demands and Task Performance During Simulated Overhead Work. *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7, 163-174. <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1551255>.

Kim, S., Moore, A., Srinivasan, D., Akanmu, A., Barr, A., Harris-Adamson, C., Rempel, D.M., & Nussbaum, M. A. (2019). 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*, 7, 185-191. <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1561557>.

Kim, S., Nussbaum, M.A., Mokhlespour Esfahani, M.I., Alemi, M.M., Alabdulkarim, S., & Rashedi, E. (2018). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*, 70, 315-322. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.025>.

Krok, A. (2017). Ord’s exoskeleton could help factory workers in a big way. <https://acceptable.cnet.com/roadshow/news/fords-exoskeleton-could-help-factory-workers-in-a-big-way/>.

Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, W., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., Jørgensen, K. (1987) Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms; *Applied Ergonomics*, pp. 233-240.

L

Lebart, L., Morineau, M., Piron, A. (2006). *Statistique exploratoire multidimensionnelle*. DUNOD, Sciences Sup.

Lee, J. D., & Seppelt, B. D. (2012). Human Factors and Ergonomics in Automation Design. In G. Salvendy (Éd.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics* (p. 1615-1642). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118131350.ch59>.

Leplat, J. (2008). *Repères pour l'analyse de l'activité en ergonomie*. Presses universitaires de France.

Levitate Technologies. (2019, 20 Mai). *Airframe*. <https://acceptable.levitatetech.com/>.

Long, J.M. (2011). *Integration readiness levels*. Aerospace Conference, Big Sky, MT. pp. 1-9.

Luque-Casado, A. et al. (2016) Heart rate variability and cognitive processing: The autonomic response to task demands. *Biological Psychology*, 113, pp.83-90.

M

Maciejasz, P., Eschweiler, J., Gerlach-Hahn, K., Jansen-Troy, A., & Leonhardt, S. (2014). A survey on robotic devices for upper limb rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 11, 3. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-11-3>.

- Maier, J.R.A., & Fadel, G.M. (2006). Understanding the Complexity of Design. In D. Braha, A.A. Minai, & W. Bar-Yam (Éd.), *Complex Engineered Systems* (p. 122-140). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-32834-3_6.
- Maier, J.R.A., & Fadel, G.M. (2009). Affordance based design : A relational theory for design. *Research in Engineering Design*, 20, 13-27. <https://doi.org/10.1007/s00163-008-0060-3>.
- Mankins, J.C. (1995). *Technology Readiness levels*. White paper. Office of Space Access and Technology. NASA.
- Marc, E., & Picarc, D. (2002). Interaction. Dans J. Barus-Michel, E. Enriquez, & A. Lévy, *Vocabulaire de la psychosociologie* (pp. 189-196). Erès.
- Martin N., Jamet É., Erhel S., Rouxel G. (2016) *From Acceptability to Acceptance: Does Experience with the Product Influence User Initial Representations?*. In: Stephanidis C. (eds) HCI International 2016 – Posters' Extended Abstracts. HCI 2016. Communications in Computer and Information Science, vol 617. Springer, Cham.
- Mayhew, D.J. (1992). *Principles and Guidelines in Software User Interface Design*. Prentice-Hall, Inc.
- Mayhew, D.J., & Mayhew, D. (1999). *The Usability Engineering Lifecycle: A Practitioner's Handbook for User Interface Design*. Morgan Kaufmann.
- McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, (24), 91-99. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S).
- Meunier, P. (1997). *Protocole pratique de mesurage et d'analyse cardiofréquencemétrique* Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP), Vol. 3.
- Meunier, P. (2014). *Cardiofréquencemétrie pratique en milieu de travail : Une approche objective de la pénibilité professionnelle*. Éd. Docis.
- Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Salotti, J.-M., Thibault, J.-F., & Claverie, B. (2017). Human Factors Issues for the Design of a Cobot System. In P. Savage-Knepshield & J. Chen (Éd.), *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems* (Vol. 499, p. 375-385). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41959-6_31.
- Moyon, A., Petiot, J.-F., & Poirson, E. (2019). Development of an Acceptance Model for Occupational Exoskeletons and Application for a Passive Upper Limb Device. *IJSE*

Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors, 7:3-4, 291-301, <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1662516>.

Moyon, A., Poirson, E., & Petiot, J.-F. (2018). *Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations*. *Procedia CIRP, ELSEVIER*, 2018, 70 (pp. 284-289). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.028>.

Moyon, M., Subrin, K., & Furet, B. (2018, octobre 1). *Acceptation criteria of a movable cobot for polishing activities in naval industries*. Communication présentée au IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Madrid, Spain. (hal-01991638).

Moyon, A., Petiot, J.-F., & Poirson, E. (2019). *Investigating the effects of passive exoskeletons and familiarization protocols on arms-elevated tasks*. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2019 Annual Conference*.

N

Neely, G., Ljunggren, G., Sylvén, C., & Borg, G. (1992). Comparison between the Visual Analogue Scale (VAS) and the Category Ratio Scale (CR-10) for the Evaluation of Leg Exertion. *International Journal of Sports Medicine*, 13(2), 133-136. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021244>.

NF EN 614-1+A1. (2009). *Sécurité des machines - Principes ergonomiques de conception - Partie 1 : terminologie et principes généraux*.

NF EN ISO 8373. (2012). *Robots et composants robotiques – Vocabulaire*.

Nielsen, J. (1993) *Usability engineering*. San Diego, CA: Academic Press.

Nielsen, J. Landauer, T.K. (1993), *A mathematical model of the finding of usability problems*. In *Proceedings of ACM INTERCHI'93 Conference* (Amsterdam, Netherlands: ACM Press), pp. 206-213.

Norman, D.A. (1988). *The Psychology of Everyday Things*. Basic Books. <https://books.google.fr/books?id=OINSRAAACAAJ>.

O

Oliver, R.L. (1980) A Cognitive Model of the Antecedents and Consequences of Satisfaction Decisions. *Journal of marketing research*. 460–469.

Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. Productivity Press.

Ouellet, S., & Vézina, N. (2008). Savoirs professionnels et prévention des TMS : Réflexions conceptuelles et méthodologiques menant à leur identification et à la genèse de leur construction. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, 10-2. <https://doi.org/10.4000/pistes.2251>.

P

Parasuraman, R., Mouloua, M., & Molloy, R. (1996). Effects of Adaptive Task Allocation on Monitoring of Automated Systems. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 38, 665-679. <https://doi.org/10.1518/001872096778827279>.

Perry, J.C., Rosen, J., & Burns, S. (2007). Upper-Limb Powered Exoskeleton Design. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12, 408-417. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2007.901934>.

Pettersen Jostein. (2009). Defining lean production: Some conceptual and practical issues. *The TQM Journal*, 21, 127-142. <https://doi.org/10.1108/17542730910938137>.

Phillips, E.L. (2010). *The development and initial evaluation of the human readiness level framework* (MS Thesis). The NPS Institutional Archive.

R

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies ; approche cognitive des instruments contemporains*. Armand Colin, pp.239. hal-01017462.

Rashedi, E., Kim, S., Nussbaum, M.A., & Agnew, M.J. (2014). Ergonomic evaluation of a wearable assistive device for overhead work. *Ergonomics*, 57, 1864-1874. <https://doi.org/10.1080/00140139.2014.952682>.

RB3D. (2019, 30 Mai). *RB3D We Multiply your capacity*. <http://acceptable.rb3d.com/applications/manipulation-doutils/>.

Reason, J.T. (1990). *Human error*. Cambridge University Press.

Redström, J. (2006). Towards user design? On the shift from object to user as the subject of design. *Design Studies*, 27, 123-139. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.06.001>.

Rodden, K., Hutchinson, W., & Fu, X. (2010). *Measuring the User Experience on a Large Scale: User-Centered Metrics for Web Applications*. Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems - CHI '10 4. ACM Press.

Rogers, Everett M. (1962). *Diffusion of Innovation* (first ed.), Free Press of Glencoe, New York.

S

Sadin, S.R., Povinelli, F.P., & Rosen, R. (1989). The NASA technology push towards future space mission systems. *Acta Astronautica*, 20, 73-77. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(89\)90054-4](https://doi.org/10.1016/0094-5765(89)90054-4).

Sanders, M.S., & McCormick, E.J. (1993). *Human factors in engineering and design* (Seventh edition). McGraw-Hill.

Service de la technologie et de la stratégie France, Groupe Brime, Eurosyn Développement. (1997). *L'ingénierie centrée sur l'homme : ou la prise en compte des facteurs humains dès les premières phases de la conception*. Broché, Paris.

SkelEx. (Rotterdam, Netherland). (2019, 30 Mai). <https://acceptable.skelex.com/>.

Spada, S., Ghibaud, L., Gilotta, S., Gastaldi, L., & Cavatorta, M.P. (2017). Investigation into the Applicability of a Passive Upper-limb Exoskeleton in Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*, 11, 1255-1262. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.252>.

Strausser, K.A., & W. Kazerooni, (2011). *The development and testing of a human machine interface for a mobile medical exoskeleton*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, pp. 4911-4916.

Superflex. (SRI International). (2019, 30 Mai). *L'exosquelette souple et auto-apprenant*. <https://exoskeletonreport.com/2016/04/sri-robotics-super-flex-exosuit>.

Sympo, (Syndicat des entreprises de technologies de production). (2011). *Robotisation – mode d'emploi*. Editions Techniques de l'ingénieur.

T

Tanaka, Monahan, Seals (2001) Age predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37, Issue 1.

Theurel, J., & Atain Kouadio, J-J. (2017, juin 13). INRS. <https://acceptable.carsat-cvl.fr/files/live/sites/carsat->

cvl/files/Fichiers/entreprises/offre%20documentaire/tms/exosquelettes-Inter%C3%AAts_et_limites.pdf.

Theurel, J., & Claudon, L. (2108). *Exosquelettes au travail : Impact sur la santé et la sécurité des opérateurs état des connaissances*. INRS, ED 6311, 32.

Theurel, J., & Desbrosses, K. (2019). Occupational Exoskeletons: Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1638331>.

Theurel, J., Desbrosses, K., Roux, T., & Savescu, A. (2018). Physiological consequences of using an upper limb exoskeleton during manual handling tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 211-217. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.10.008>.

U

Upasani, S., Franco, R., Niewolny, K., & Srinivasan, D. (2019). The Potential for Exoskeletons to Improve Health and Safety in Agriculture—Perspectives from Service Providers. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7, 222-229. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1575930>.

V

Van Elslande, P. (2000). L'erreur humaine dans les scénarios d'accident cause ou conséquence ? *Recherche - Transports - Sécurité*, 66, 7-31. [https://doi.org/10.1016/S0761-8980\(00\)90002-5](https://doi.org/10.1016/S0761-8980(00)90002-5).

Van Engelhoven, L., Poon, N., Kazerooni, W., Rempel, D., Barr, A., & Harris-Adamson, C. (2019). Experimental Evaluation of a Shoulder-Support Exoskeleton for Overhead Work: Influences of Peak Torque Amplitude, Task, and Tool Mass. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 7, 250-263. <https://doi.org/10.1080/24725838.2019.1637799>.

Van Geer, F.J. (2016) *Performance testing of the Skel-Ex funded by STW Take Off grant awarded to Skel-Ex*.

Vardouli, T. (2015). Making use: Attitudes to human-artifact engagements. *Design Studies*, 41, 137-161. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2015.08.002>.

Veneman, J. F., Kruidhof, R., Hekman, E. E. G., Ekkelenkamp, R., Van Asseldonk, E. W. F., & van der Kooij, W. (2007). Design and Evaluation of the LOPES Exoskeleton Robot for

Interactive Gait Rehabilitation. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15, 379-386. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.903919>.

Venkatesh, V., Morris, M.G., Davis, G.B., & Davis, F.D. (2003). User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly*, 27, 425-478. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/30036540>.

Venkatesh, V., Thong, J.W.L., & Xu, X. (2012). *Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology* (SSRN Scholarly Paper No ID 2002388). Social Science Research Network website. Consulté à l'adresse : <https://papers.ssrn.com/abstract=2002388>.

Whitmore, M., Boyer, J., & Holubec, K. (2008). Man-Systems Integration Standards: Vol. Volume 276 (In NASA-STD-3001, Space Flight Human-System Standard and the Human Integration Design Handbook).

Wilson, L. (2010). *How to implement lean manufacturing*. McGraw-Hill.

Wren, D. (2018, 20 Mai). Boeing Co. *Studying wearable exoskeletons that can reduce workplace injuries*. https://acceptable.postandcourier.com/business/boeing-co-studying-wearable-exoskeletons-that-can-reduce-workplace-injuries/article_efc6bbe0-a15d-11e8-a8c4-737ba6ec5b2e.html.

Annexes

ANNEXE 1 - Analyses ergonomiques préliminaires – Extrait de l'analyse de la charge physique de travail.

Pour le cas d'usage n°1 (opérations de finitions sur les coques de bateau, Bénéteau), une phase de pré-étude a été réalisée en collaboration avec l'ergonome en interne. Cette pré-étude était constituée d'une analyse de la charge physique du travail dont l'objectif était de déterminer les tâches les plus pénibles et d'inclure toutes les parties prenantes dans le projet.

Cette analyse a été effectuée sur la base d'un document fourni par l'INRS et est constitué de 5 parties :

Analyse réalisée en partenariat avec Béline Brinon (ergonome), Valérie Vilay (chef d'atelier) d'après le document de l'INRS : INRS (2018). *Méthode d'analyse charge physique de travail*. ED 6161. Certaines réponses ont été volontairement retirées pour des raisons de confidentialité (Figure 67).

Grille d'identification de la charge de travail :

INDICATEURS	ITEMS			
Pour cette situation de travail, avez-vous déjà observé...		Non	Oui	
Santé au travail	... un accident du travail avec arrêt ?			✓
	... des plaintes, des douleurs, une pathologie de l'appareil locomoteur ?			✓
	... une restriction d'aptitude et/ou une inaptitude ?			✓
	... une alerte du CHSCT ?			✓
Gestion du personnel	... de l'absentéisme récurrent ?			
	... un recours fréquent à l'intérim ?			
	... un turn-over significatif ?			✓
Caractéristiques de l'environnement	... l'ambiance physique de travail dégradée (bruit, température, éclairage) ?			✓
	... l'exposition aux vibrations corps entier (conduite), membres supérieurs (outils vibrants) ?			✓
	... l'exposition à des produits toxiques, des poussières... ?			✓
	... des sols encombrés et/ou dégradés et /ou en pente ?	✓		
	... l'utilisation d'équipements de travail (outils, aides techniques, équipements de protection individuelle (EPI)...) ?		✓	
	...		✓	
Organisation	... l'impossibilité de modifier la façon de faire son travail (latitude décisionnelle, choix opératoires...) ?			✓
	... des modes de fonctionnement dégradés (incident, panne, reprises...) ?		✓	
	... des horaires atypiques (travail posté, horaires irréguliers, travail de nuit, vendredi-samedi-dimanche (vsd)...) ?		✓	
	... des objectifs de production exigeants (qualité, quantité, délais...) ?			✓
	... travailler à plusieurs (organisation collective pour une tâche, partage des contraintes...) ?	✓		
Total des croix				

Pour cette situation de travail, y a-t-il des difficultés liées à...		Non	Oui mais non critiques	Oui et critiques
Efforts physiques	... des efforts exercés, des charges lourdes (soulever, pousser-tirer) ?		✓	
	... des activités de l'ensemble du corps (pelletage, piochage...) ?	✓		
	... des déplacements avec charge ?	✓		
	... des objets difficiles à saisir, fragiles ?	✓		
	... des tâches minutieuses, complexes... ?			✓
Dimensionnement	... des postures inconfortables (se pencher, se tourner, lever les bras...) ?			✓
	... des déplacements longs ?	✓		
	... des objets encombrants à manutentionner ou à déplacer ?			
	... un espace de travail inadapté (restreint, encombré...) ?	✓		
	... l'impossibilité de modifier la posture (rester debout, piétiner, assis...) ?			✓
Caractéristiques temporelles	... un travail répétitif ?			✓
	... un travail en flux tendu (nécessité de se dépêcher) ?			✓
	... la durée d'exposition à la charge physique ?			✓
	... la prise de pauses ?	✓		
	... des changements imprévus d'activité (aléas, dépendance client...) ?			

Figure 67. Extrait de l'analyse de la charge physique de travail.

ANNEXE 2 - Extrait d'interviews- Méthode d'extraction des verbatims (mots clefs).

Les interviews réalisées dans les études ont permis de faire remonter des freins ou des motivations liées à l'utilisation de l'exosquelette. Nous rappelons brièvement comment sont extraits les mots clefs d'après les interviews. Dans le Chapitre 4, l'exploration des facteurs d'acceptation démarre par une étape d'interview avec les opérateurs (chap.4, stage 1).

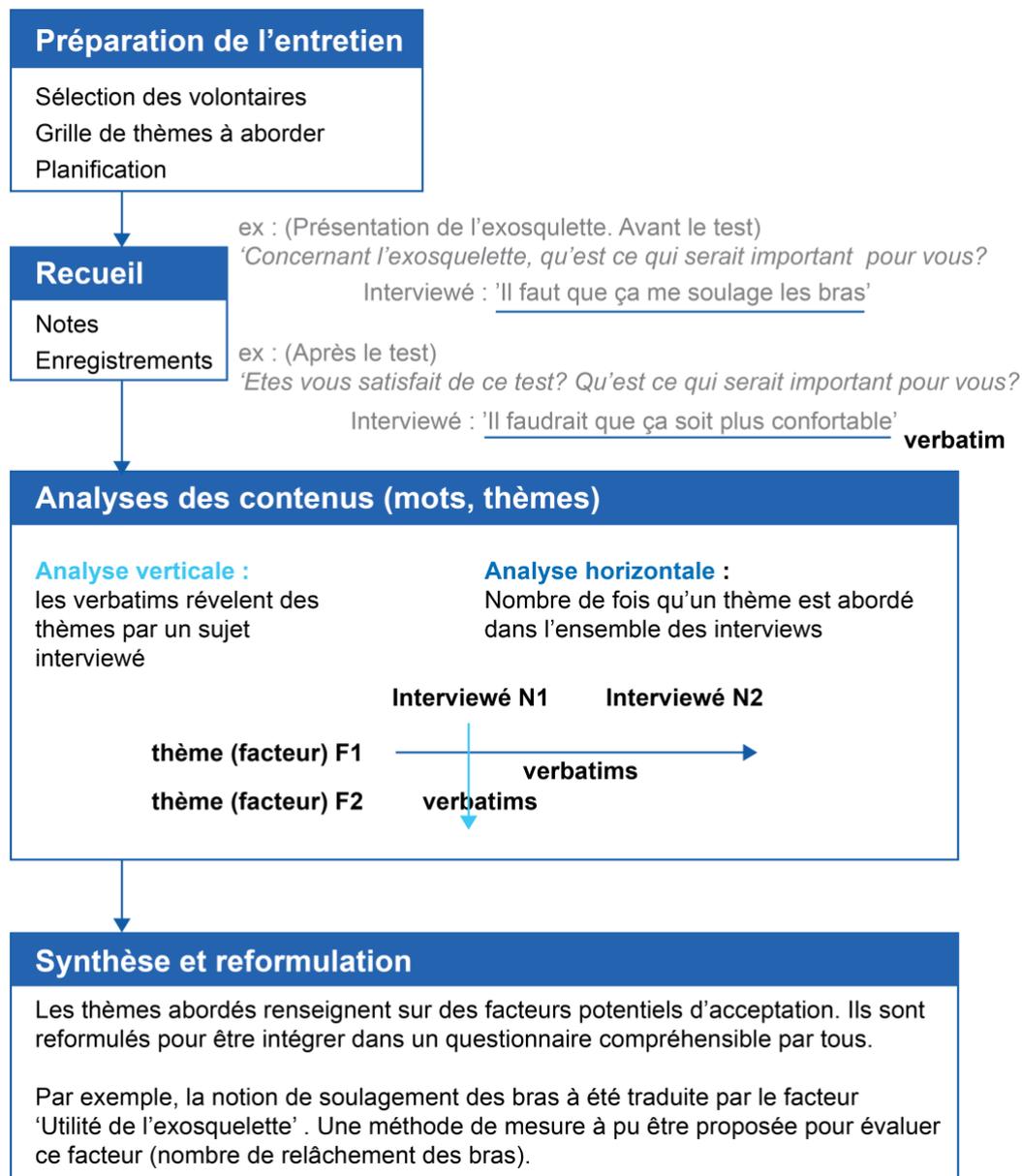


Figure 68 . Algorithme d'extraction des verbatims pour l'étude des facteurs d'acceptation. Une mise à jour du facteur 'Utile pour la tâche' a été reformulée en 'Assiste la tâche'.

ANNEXE 3 - Article IROS. Transfert de l'approche sur un robot collaboratif.

Cet article a été présenté lors de la conférence IROS (International Conference on Intelligent Robots and Systems) à Madrid le 1^{er} Octobre 2018. Il est publié dans *Procedia IROS 2018*. (hal-01991638). Il présente l'expérimentation de la démarche du projet à un cobot mobile et est mené en même temps que le travail présenté dans le chapitre 4.

Cette petite étude complémentaire a été réalisée en parallèle de l'identification des facteurs d'acceptation pour l'utilisation de l'exosquelette, et se focalise donc également sur cette phase pour la solution d'assistance par cobot (robot collaboratif). Dans cette phase, nous souhaitons identifier les facteurs de l'acceptation d'un cobot mobile destiné à assister une opération de polissage des coques de bateaux. Pour cela, la situation initiale sera caractérisée, une analyse l'activité sera réalisée (process, posture/mouvements et forces appliquées) puis une méthode de conception centrée utilisateur sera appliquée afin d'identifier les facteurs d'acceptation. Enfin l'intégration des résultats de l'étude seront commentés ainsi que les limites et perspectives observées.

Acceptation criteria of a movable cobot for polishing activities in naval industries

Aurélie Moyon¹, Kévin Subrin² and Benoit Furet²

¹A. Moyon is with ROMAS and PACCE Team, Ecole Centrale de Nantes, LS2N (UMR CNRS 6004), 1 rue de la Noë, 44321 NANTES Cedex 3, France - {aurelie.moyon}@univ-nantes.fr

²K. Subrin and B. Furet are with ROMAS Team, LS2N Research Laboratory University of Nantes, IUT, 2 av Prof Jean Rouxel 44470 Carquefou, France - kevin.subrin;benoit.furet}@univ-nantes.fr

ABSTRACT

Naval industries is currently in mutation. Operations such as polishing are still today manually performed due to traditional context and “hand-made” is seen as a quality made. Unfortunately, it leads to musculoskeletal disorders and many ways are currently investigated to improve the working conditions. Even if exoskeleton or cobot (collaborative robot) were proposed few years ago, their integration in France stays limited. Moreover, companies faced to a fear of operators to let their job to a robotic system even if they try to reinsure it by showing that these systems need their expertise. In order to help the operator in its job, a movable cobot was designed to perform simple and tiring polishing activities where the operator has a low added value. This paper deals with a methodology to identify, analyse and measure the acceptability factors to integrate a system to help the operator in its activity. After the description of the problematic that naval industry currently meets and the activities to be performed, the dimensions of acceptance of a cobot are analysed. Then, the movable cobot is presented. Finally, the development of the cobot and the feedback of the acceptance of such an assistive system tested by the company is highlighted.

INTRODUCTION

Naval industry is currently in mutation due to a growth in their activities. Traditional operations such as polishing are manually performed due to several reasons. First of all, these companies produce products with high added values and hand-made is a guarantee of quality. Secondly, the dimension of their product (several ten of meters) is so large that investment cost can be important. Finally, companies wonder how it will impact their process knowing that a new process is time-consuming.

Though, the cost related to Musculoskeletal Disorders (MSD) pushes industrial companies to improve the working conditions. Even if the first generation of exoskeletons were born in late 1960s, numerous exoskeleton stays bulky, heavy, not adapted to human morphology and their integration in France stays limited due to several ergonomic factors. Recent developments on exoskeleton are numerous based on new material use, new control law and sensors systems with a deep study on the behavior of arms and legs for a better intuitiveness [1]. Ergonomics is a key to integrate these new systems and in recent years, Ergoskeleton terms appeared to describe new systems that could be able to give feedbacks about the ergonomics of person's movement [2].

Various architectures allow for example the transfer of the loading to carry it to the legs (Strongarm® [3]) or to give upward force to the forearm to compensate for the weight of the tool and help maintain posture (Exoskeleton *Ske/Ex*). This passive exoskeleton is promising solutions for their autonomy [4]. These systems are dedicated for one task and one posture (Figure 69). Once the person switches to another task, the assistance can be easily deactivated by lowering arms down, allowing natural gestures. These systems are not perfect but provide physical help and are well suited for exiguous workspaces.



Figure 69. An operator with the exoskeleton (left) and without (right) is performing polishing activities.

Even if these systems seem to be well adapted, operators' feelings must be taken into account and human factors are important criteria that need to be studied. Recent works present interdisciplinary projects which mix researches in cognitive sciences, ergonomics, mechatronics, and mechanical engineering to propose dedicated system to help operators in their jobs [5].

Technological Readiness Level (TRL) presented its limit to insert systems in companies and new scales with human factors were presented [6]. The novelty of the paper is to experiment a user-centered method based on acceptability criteria evaluation [7, 8] on a movable cobot. Robots are more and more used in company for repetitive tasks but, for flexible products, cobots are more and more used in order the operators to interact easily with it. Cobot is a derivative of robot where cobot means collaboration between humans and the robotic system. Various manufacturers of robotic solutions based on different technologies. Solutions allow sharing workspaces or directly working with the robot. Depending on the task to be performed, the energy of the cobot represents the limit in order the operator to be able to interact. Its integration must follow the Directive « Machines » 2006/42/CE. In this paper, we present the development done around a new robotic system which is a movable cobot. A Universal Robot UR 10 is fixed to a Neoditech® platform allowing to perform tasks around boat hull. This paper is organized as follows: the polishing activity is first characterized. Due to the importance to consider the operator as a pilot for the movable cobot, a copy of the human gesture is analysed with videos and the record of forces. We then focus on the development performed on the movable cobot and the methodology to characterize the acceptance of the system with trials performed with an operator. We finally present the integration inside the companies and the strategy that will be used to insert this new technology inside this company.

POLISHING ACTIVITIES CHARACTERIZATION

Activities in the company

Hull striping of high dimension hull is a complex operation leading to various defects. Operators, after having a look at the hull must perform reparations and on every hull, they must perform tasks on the parting line of the mold. Polishing activities has shown that the operator dislikes operating on high scale surfaces or with tiring postures: he squats, raises the hands above shoulders and the applied forces were considered as “critical”. These postures have a high risk of provoking musculoskeletal disorders (MSD) and justify the need for assistance. High-quality standards force the operator to control meticulously the completion of the polishing system. To facilitate the introduction of the movable cobot, the objective is to simplify the learning of the trajectory of the cobot by the operator specifying two points (start point and end point) representing a polishing window (Figure 70). To well understand how the operator behaves, a task analysis was done.

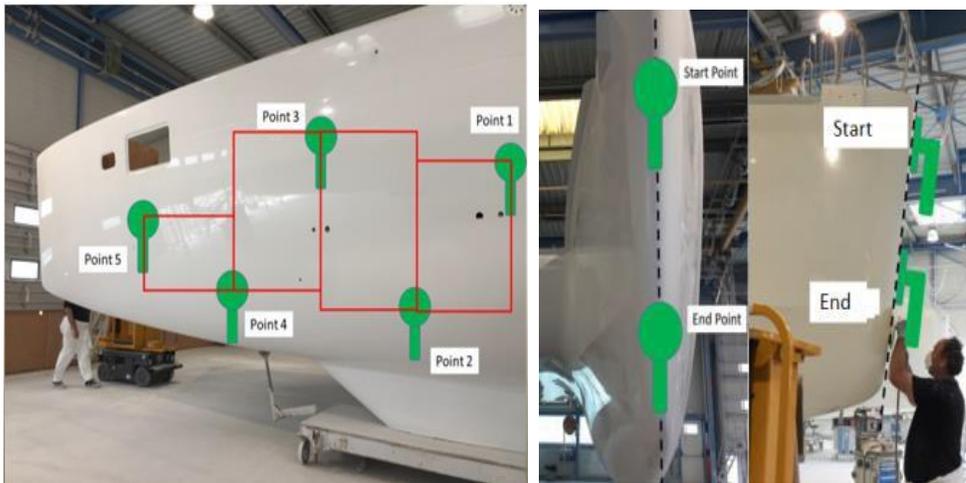


Figure 70. Activities to be performed on boat: polishing window selection

Task analysis

To acquire the know-how of the operator, a serial robot maintains a Kistler sensor on which a representative part of polishing activities is fixed (Figure 71). Various positions corresponding to the one lived by the operator allow us to understand the strategy used by the operator to reach the expected quality. It can be observed that operators perform some vertical and horizontal trajectories (grid pattern) and depending on the rotation direction of the polishing system, he applied forces or not. The forces are quite important reaching some picks of 60N. After the activity, an evaluation questionnaire allowed to characterize global satisfaction, utility, physical, cognitive and occupational impacts.

MOVABLE COBOT DEVELOPMENT

The movable cobot is a Universal Robot UR10 with a maximum payload of 100N (Figure 72). A force sensor Optoforce® is fixed on the end effector to improve the behavior of the robot extracting the process forces and torques applied on the boat. The polishing system is the one used by the operator, a pneumatic one. All the system is fixed on a Neoditech® system which is a heavy platform allowing the displacement of high loading on a large surface around it. In our case, the Neoditech® platform is able to maintain a loading of 500N at 2 m around the platform. The platform is equipped with one steered wheel. The controller of the robot is fixed on the platform. 2 wires stay on the floor: the pneumatic alimentation and an electric wire

which allows the displacement by hand of the cobot on the floor. The Neoditech® version is a standard one where the robot raises at 2m high. Some improvements will be done in the final version to be able to reach all the surfaces of the hull.



Figure 71. Polishing activity on a kistler sensor following various postures, recording of the forces.

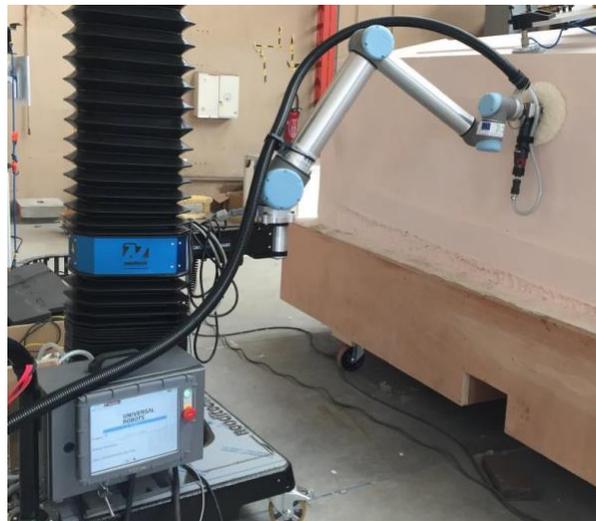


Figure 72. Movable cobot including Neoditech® system, UR10 equipped with Optoforce

ORGANIZATION OF THE DEVELOPMENT BETWEEN COMPANY AND UNIVERSITY OF NANTES

The acceptance of a new system needs the support of the whole company: operators, manager and the management board. Project team includes the responsible of the numerical transition, an ergonomist, and a production manager. Developments are performed by the

University of Nantes. It is a 9 months project including 6 months to develop it and 3 months to test it inside their workshop in order to reach the final specifications of the movable cobot. During 6 months, 3 meetings have been operated. The first one was to understand company expectations regarding operator's assistance. The second one was conducted with an operator to evaluate the prototype and gather his perception. The last one will take place at the end of September 2018 with the direction and the project team before cobot implementation on site. Once the development performed, verification and validation steps are performed inside our center of research and unsuitable use is tested. Inside the company, a Failure Mode and Effects Analysis has been done to prevent risks. Confidence is built from the very first moment of use.



Figure 73. An operator is manipulating the polishing system to learn the window to polish

ACCEPTANCE OF THE SYSTEM

During the study of the acceptance, the operator is aisle from the project team and training is performed by the responsible of the project. It includes a presentation of the cobot system, some trials with the force control to manipulate the cobot by hand and a presentation of the interface developed for this application. The Interface Human Machine integrates a common interface “Universal Robot” including a “play” button allowing the launch of a dedicated program.

Once the program is launched, pop-up windows ask for the parameters in terms of disc diameter, % of the coating surface, orientation of the window to polish (horizontal or vertical) and the learning of the first point and the second point (Figure 73). The duration of the learning

phases takes 1min 30. Once everything is recorded, the robot starts the polishing of the surface. The operator observes the robot and gives it feedback about the results. The project team does the same in order us to listen everybody on the topic. The methodology used for the acceptance follows 5 steps (Figure 74):

- Study of the literature on technology acceptance and gather factor hypothesis.
- Observe and analyse the occupational context: we carried out an ergonomic occupational analysis and gathered insights into what could change with a cobot in this context. Based on observations, we built an interview grid to self-confront operators on observations.
- Identify subjective satisfaction criteria from operators: operators were asked to describe their tasks and describe the time, type of strain they encountered. Acceptability criteria are identified from an open interview and scored by the distribution of 100 points among the criteria mentioned.
- Propose factors measurements: from usability measurement literature, we assessed measurement methods. When no methods existed we used the previous observation and self-confrontation stages to assess relevant hypothesis.
- Integrate factors in the program: an industrial integration program was discussed and written with project group, detailed later.

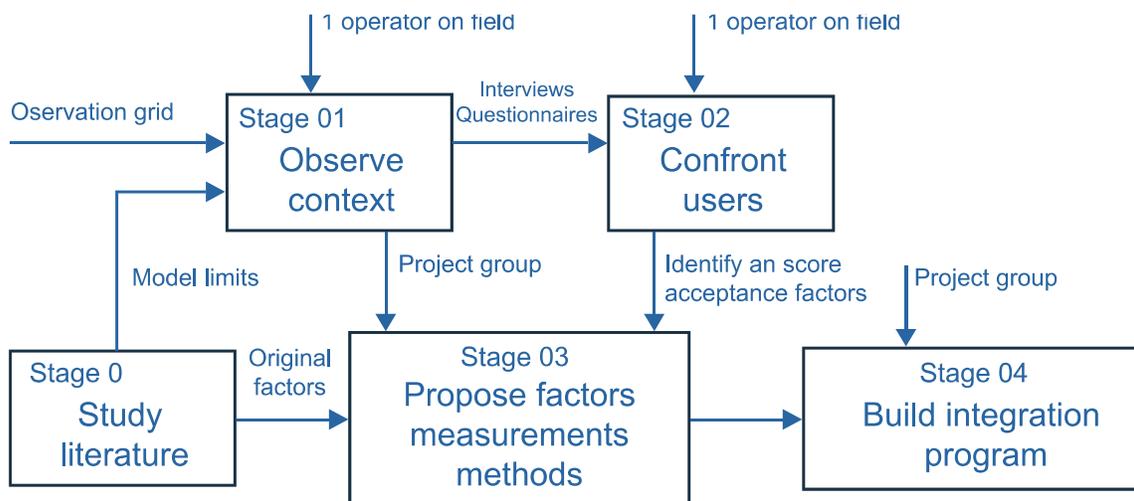


Figure 74. The methodology applied to analyse the acceptance of the cobot and better integrate the system.

RESULTS

Characterization of acceptance factors from the field

From open interview, the operator verbalized several notions related to acceptance.

To the question: *'what would be the necessary conditions for you to accept this new system on your daily life?'*

The answers were related to the notion of Control (physical and perceptive): 'need to control the machine, move it freely' and 'feel you keep control on the work', 'I could teach him, it executes'.

To Utility: 'has to release pain' and 'do the job'.

To Usability: 'easy to use, to learn'. To Impact on work: 'it has to perform the same quality standards', 'cannot check on his work and redo the work'. The operator was cautious on how this new system could influence his maneuverability 'it is maybe not useful for all tasks so I need to be able to move it quickly and move around easily. Cables would be a problem.' Verbatims were rephrased into factors: Utility, Usability, Control/Appropriation and Occupational Aspects. We merged them with selected factors from literature that are related to our context.

Factors of acceptance and measurements methods

From field study and literature analysis, we proposed to measure factors with both objective and subjective methods. The measurements of factors will be done in a further study. Table 1 shows factors and their related measurement methods.

Table 15. Factors and associated method to evaluate the perception of the movable cobot.

Factor	Objective measure	Method	Objective measure	Method
Affective aspects				
Subjective user satisfaction			Verbatims, scoring factor categories with 100 points	Individual survey after 15 min test
Cognitive aspects				
Efficiency for quality standards	Quality control	Number of returns in workshop	Evaluation (scoring on Likert scale)	Individual survey after 15 min test
Ease of learning/ memorizing	Donning/adjusting/ doffing timings	Time recording	Evaluation (scoring on Likert scale)	Individual survey after familiarization
Easy to use	Number of complaints during tasks	number of complaints (notebook)	Evaluation (scoring on Likert scale)	Individual survey after 15 min test
Control perception	Prehension behaviour with device	cobot log records of prehension	Self confrontation (verbatims)	Individual survey after 15 min test
Perceived exertion	Perceived exertion	perceived exertion Borg scale.with /without device	Borg scale, self confrontation (verbatims)	Individual survey after 15 min test
Occupational aspects				
Utility/utility for all task	Number of arm releasing	Observation and counting	Evaluation (scoring on Likert scale)	Individual survey after 15 min test
Safety/minimum errors	Errors due to cobot	Counting number of errors	Evaluation (scoring on Likert scale)	Individual survey workshop log
Occupational impacts	Task duration	Recording of task duration with /without	Self confrontation (verbatims)	Individual survey after use from 15min to 2h
Physical aspects				
Physical control	Number of readjustments during task	Counting number of physical interactions	Evaluation (scoring on Likert scale) prehension manoeuvrability	Individual survey after 15 min test
Physical impacts	Cardiac cost, posture analysis	Cardiac cost protocole, posture observation (RULA)	Evaluation (scoring on Likert scale) Self confrontation (verbatims)	Individual survey after 15 min test

A framework for a better industrial design

This user-centered methodology that will be translated into design recommendations. For example, the need of 'feeling control' from perception will stress specific attention to hands prehension and system maneuverability. New human gestures will have to stay as natural as possible to avoid new physiopathogenic postures. The physical interaction with this cobot (without Optoforce) starts when 10N is detected. Moving it while carrying the digital tablet was difficult for a long period. It seemed obvious to install a handle with a button to be able to manipulate the cobot with 2 hands. Moreover, a support will be designed to carry the tablet. In this way, easy to use/learn will be answered by a smooth human interaction, balanced with preprogrammed actions but that will allow flexibility. These design criteria will be integrated in the new version of the system in order to better perform the task.

CONCLUSION

This paper presents a user-centered method to integrate a movable cobot for activities in naval industries. It allows the characterization of the process performed by the operator. Then, a methodology based on various step allows defining the human factors to take into account and the maturity to integrate the system inside the company. From this model we can build an integration protocol from familiarization to adoption that will suit the case study environment.

PERSPECTIVE

The perspectives are numerous as the integration inside the companies is soon. Some questionnaires are currently being prepared to evaluate via a quantitative study the desire for control [7], the attitude towards the robot [8] and other qualitative factors regarding the quality of the robot work. Once the robot will be operational, a new usability test will be conducted to study the physical and cognitive interaction with the movable cobot to conclude if the cobot is well adapted to the tasks. This architecture seems to be promising for this application and the board management has high expectations in this solution.

ACKNOWLEDGEMENT

We acknowledge BJ Technologies which is a worldwide leader in boat manufacturing. They allowed us to conduct our experimentations with their staff. We thank Elvin Toh and Nicolas Houssais for their work.

REFERENCES

- [1] A. J. Young, D. P. Ferris, State of the art and future directions for lower limb robotic exoskeletons. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2017, vol. 25, no 2, p. 171-182
- [2] K. Le, Sensor Placement and Wearable Garments: Considerations for Medical and Fitness Data. *AATCC Review*, 2017, vol. 17, no 4, p. 38-43.
- [3] H. Debusk, K. Babski-Reeves, H. Chander, Preliminary Analysis of StrongArm® Ergoskeleton on Knee and Hip Kinematics and User Comfort. In : *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Sage CA: Los Angeles, CA : SAGE Publications, 2017. p. 1346-1350.
- [4] H. S. Lo, S. Q. Xie, Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation: State of the art and future prospects. *Medical engineering & physics*, 2012, vol. 34, no 3, p. 261-268.
- [5] M. Goodrich, A. Schultz, C. Alan, Human–robot interaction: a survey. *Foundations and Trends in Human–Computer Interaction*, vol. 1, no 3, 2008, pp. 203-275.
- [6] T. Moulières-Seban, D. Bitonneau, J-M. Salotti, Human Factors Issues for the Design of a Cobotic System. In : *Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems*. Springer, Cham, 2017. pp. 375- 385.
- [7] A. Steinfeld, T. Fong, D. Kaber, Common metrics for human-robot interaction. In: *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART conference on Human-robot interaction*. ACM, 2006. pp. 33-40.
- [8] A. Moyon, E. Poirson, J.-F. Petiot, Experimental study of the physical impact of a passive exoskeleton on manual sanding operations. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 70, p. 284-289.
- [9] J. M. Burger, Desire for control, locus of control, and proneness to depression. *Journal of Personality*, 1984, vol. 52, no 1, p. 71-89.
- [10] D. S. Syrdal, K. Dautenhahn, K. L. Koay, The negative attitudes towards robots' scale and reactions to robot behaviour in a live human- robot interaction study. *Adaptive and Emergent Behaviour and Complex Systems*, 2009.

ANNEXE 5 - Questionnaire d'évaluation Interaction Humain-Exosquelette.

Au cours du travail de recherche, trois versions du questionnaire ont été élaborées à partir de l'analyse de la littérature et en accord avec les groupes projets des cas d'usages. L'objectif était de pouvoir évaluer la perception des opérateurs de manière simple, courte (pas plus de 10 min). Des itérations ont été effectuées pour répondre à ces objectifs et pour être facilement compréhensibles par toutes les parties prenantes. Par exemple, certains termes ont été changés pour être mieux compris de la population des opérateurs. La version finale du questionnaire ci-après a été utilisée lors de l'expérimentation terrain présentée au chapitre 5. Des adaptations mineures ont été réalisés pour l'expérimentation en laboratoire et concernent les questions liées à l'activité industrielle (intégration dans l'activité, dans l'environnement de travail). Toutes les questions sont établies sur une échelle de 0 à 10 avec des ancrages définis, dont la compréhension a été testée par les opérateurs.

Version finale :

Questionnaire Exosquelette EXO Terrain

Terrain_Exo

* Required

1. *Installation* L' apprentissage de l'installation est facile *

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord										

2. *Ajustement* L'apprentissage de l'ajustement est facile *

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord										

3. *Antécédents (avant installation)* Avez-vous déjà été formé à l'installation et à l'utilisation d'un exosquelette? * Mark

only one oval.

Oui

Non

Après la tâche

4. *Efforts demandés* Maîtriser l'exosquelette demande * Mark

only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Aucun effort	<input type="radio"/>	Un effort extrêmement important										

5. Avec l'exosquelette, je me sens moins fatigué après la tâche *

Mark only one oval.

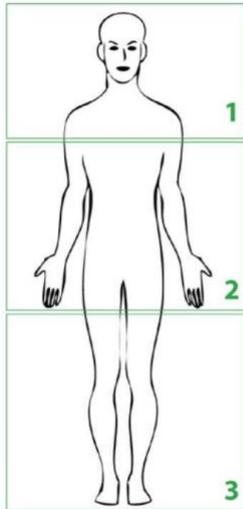
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord										

6. Après la tâche, mon niveau d'effort ressenti global est de : *

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Rien	<input type="radio"/>	Maximal										

7 Dans quelle(s) zone(s) est transféré l'effort global ressenti ?

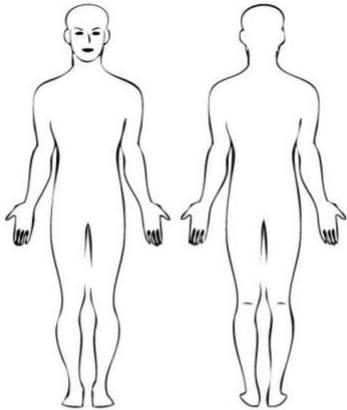
*



Check all that apply.

- Zone 1
- Zone 2
- Zone3

8. Après la tâche, mon niveau d'effort ressenti local est transféré dans: *



- 0 rien
- 0,3
- 0,5 extrêmement faible
- 1 très faible
- 1,5
- 2 faible
- 2,5
- 3 modéré
- 4
- 5 dur
- 6
- 7 très dur
- 8
- 9
- 10 extrêmement dur

	0	0,3	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8	9	10
Epaules/bras?	<input type="checkbox"/>														
Coudes/avant-bras?	<input type="checkbox"/>														
Poignets/main?	<input type="checkbox"/>														
Haut du dos?	<input type="checkbox"/>														
Bas du dos ?	<input type="checkbox"/>														
Cou?	<input type="checkbox"/>														
Jambes?	<input type="checkbox"/>														

9 Je juge l'apport de l'exosquelette aux tâches : *

Mark only one oval.

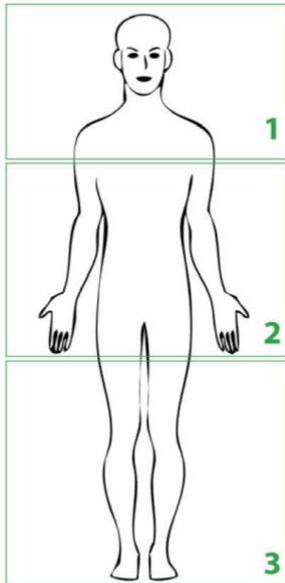
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Marginal	<input type="radio"/>	Extrêmement important										

10. Le système est confortable *

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout confortable	<input type="radio"/>	Extrêmement confortable										

11. Il y a des zones de gênes dues à l'exosquelette :



Check all that apply.

- Zone 1
- Zone 2
- Zone3

12. Quel est le niveau de pression ressenti sur mes :*

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Epaules/ bretelles?	<input type="radio"/>										
Torse/ strap?	<input type="radio"/>										
Haut du dos?	<input type="radio"/>										
Bas du dos?	<input type="radio"/>										
Hanches/ ceinture?	<input type="radio"/>										
Supports de bras ?	<input type="radio"/>										

13 **Je trouve ce système facile à utiliser ***

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord										

14 **Apprendre à réaliser les gestes est facile ***

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord										

15 **L'exosquelette me demande un effort supplémentaire de concentration ***

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Pas du tout d'accord	<input type="radio"/>	Tout à fait d'accord									

16 **Avec l'exosquelette, j'ai réalisé mes opérations avec la même qualité ***

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Tout à fait d'accord	<input type="radio"/>	Pas du tout d'accord									

17 **Avec l'exosquelette, ma performance évolue, je me sens : ***

Mark only one oval.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Beaucoup moins performant	<input type="radio"/>	Beaucoup plus performant										

18 **L'exosquelette vous semble-t-il dévalorisant ***

Mark only one oval.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Extrêmement dévalorisant	<input type="radio"/>	Pas du tout dévalorisant									

19 **Je trouve que ce système s'intègre bien dans mon activité. ***

Mark only one oval.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Pas du tout Parfaitement

20 Si plutôt Oui :grâce à quoi? Plutôt Non : Pourquoi? *

21. Je me sens en sécurité avec l'exosquelette * Mark only one oval.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Pas du tout Absolument

22. L'exosquelette s'intègre bien dans mon environnement de travail (compatibilité équipement...) * Mark only one oval.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Pas du tout Parfaitement

23. Mon niveau de satisfaction globale pour ce système est * Mark only one oval.

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Extrêmement pas satisfait Tout à fait satisfait

24. Si besoin, j'utiliserai ce système : * Mark only one oval.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Jamais Tout le temps

25. Je conseillerais ce dispositif à un collègue/ une autre personne * Mark only one oval.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Pas du tout Absolument

26. Commentaires/remarques *

ANNEXE 6 - Supports de familiarisation F1 (brochure) et F2 (tutoriel)

F1 : brochure fournie par le constructeur (extrait). *Le document complet étant très long, un extrait est présenté ici et le document original pourra être posté sur le serveur de l'Ecole Centrale.*

4) Longueur du bras

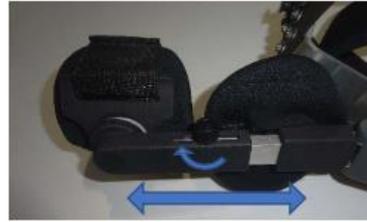
4.1



Modifiez la longueur du bras de l'exosquelette Skelex 360 à l'aide du curseur situé à l'intérieur du bras Skelex. Skelex conseille d'utiliser le réglage du bras qui correspond le plus à la taille de votre chemise. Si la taille de votre chemise n'apparaît pas dans le tableau, Skelex vous conseille d'utiliser la taille la plus proche.

Taille de chemise	Skelex conseillé
S	S
M	M
L	L

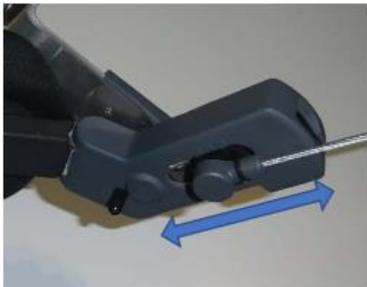
4.2



Modifiez la longueur de l'exosquelette Skelex 360 en faisant glisser le bras Skelex vers l'intérieur ou l'extérieur. Déverrouillez ce réglage en ouvrant la vis à molette d'un tour et positionnez-la à proximité de l'indicateur de taille conseillé.

5) Force adjustment – Related to total body weight.

5.1



Ajustez l'intensité de l'assistance Skelex au poids de vos bras. Le poids des bras représente environ 4% à 5% du poids total de votre corps.

Poids corporel (kg)	Étape d'ajustement	Force d'appui
50	1 st	0.5 kg
65	2 nd	1.0 kg
80	3 rd	2.0 kg
95	4 th	3.5 kg

5.2



Pour modifier la force, tournez le levier de sorte que l'indicateur se trouve sur la position souhaitée.

Installer

Avant d'installer l'exosquelette Skelex 360, assurez-vous que les tiges, la ceinture et les bras soient correctement dimensionnés à la taille de votre corps. Suivez les étapes décrites dans la section "Dimensionnement initial". Ouvrez également le velcro de la ceinture et ouvrez la boucle de la sangle de poitrine.

<p>1. </p> <p>Mettez l'exosquelette Skelex 360 comme un sac à dos en le tenant par les bretelles.</p>	<p>2. </p> <p>Fermez la ceinture dans une position confortable.</p>
<p>3. </p> <p>Attachez la sangle de poitrine à une hauteur confortable et resserrez-la de manière à ce que les bretelles ne soient pas trop lâches.</p>	<p>4. </p> <p>Serrez toutes les sangles et vérifiez l'ajustement dans la section suivante.</p>
<p>5. </p> <p>Déplacez vos bras verticalement vers le haut et sur les côtés pour vérifier que votre amplitude de mouvement est libre.</p>	<p>6. </p> <p>Abaissez le support de bras Skelex avec une main et venez la chercher avec l'autre main.</p>
<p>7. </p>	<p>8. </p>

F2 : tutoriel 'expert' Exo B

EXO B 'TUTORIEL FAMILIARISATION'

Script de familiarisation à l'exosquelette, et formation à l'installation/ajustement/désinstallation (trame pour optimiser la formation et développer un tutoriel vidéo env.5min).

Objectif : atteindre un niveau 4 sur l'échelle HEFL à l'issue de la formation = **niveau de 'l'habilitation'** délivrée par l'entreprise. (Connaissance des principes de base et de sécurité, 'calibration'= installation confortable avec gestes simples, connaissance et expérience des limites).

(Introduction)

Je vais vous présenter l'exosquelette, son fonctionnement de base et quelques principes pour l'utiliser en toute sécurité. Ensuite nous allons voir comment l'installer, l'ajuster et le désinstaller.

(Principes généraux/sécurité/conditionnement)

Donc tout d'abord, qu'est-ce que c'est ? C'est un dispositif d'assistance physique, destiné à soulager la pénibilité au travail lors des tâches 'bras levés'. Il est conçu pour aider à maintenir cette posture mais n'est pas conçu pour le port de charges lourdes. Il est très léger (2-3kg) et n'embarque aucun système électronique. Ce modèle est dit 'passif' car il n'y a pas besoin de source externe d'énergie pour le faire fonctionner. Son fonctionnement est uniquement mécanique. L'assistance fonctionne grâce aux ressorts plats situés dans le dos, qui se comportent comme des règles que l'on tord (on mime la structure avec la main). Dès lors que vous allez mettre votre bras dans le support de bras (on montre le support) et commencer à baisser le bras, vous allez sentir une tension, c'est comme ceci que vous allez 'charger' le ressort'. En position basse, l'assistance n'a pas d'effet. Vous sentirez l'assistance de manière progressive.

(Sécurité)

L'action est très rapide, il faut donc faire attention lorsqu'on le manipule, pour ne pas se blesser avec (on relâche le support pour montrer le risque). Il faudra le relâcher doucement lors de la désinstallation que je vous montrerai plus tard.

(Démystification)

On est encore loin de la science-fiction, mais le système donne un certain soutien aux bras. Il est conçu pour aider dans cette posture et il varie en efficacité sur cette plage (montrer schéma). Il va être limité sur ces les gestes extrêmes (monter sur le schéma).

(Préréglages)

Donc, cet exosquelette se présente comme un sac à dos, avec quelques réglages que l'on peut régler avant ou une fois sur soi. 3 préréglages possibles : la longueur des tiges en fonction de la longueur du buste : vous dévissez la molette et glissez la tige (montrer les éléments). Pour la longueur des bras, vous dévissez un peu ici et glissez le support. Et pour la régler l'intensité de l'assistance, vous levez et tournez la clef comme ceci (montrer les éléments). L'intensité

maximum est atteinte lorsque le câble est en haut, il est alors tendu au maximum. Ensuite les réglages du gilet sont comme ceux d'un sac à dos, vous avez les straps des bretelles avec le strap pectoral et le strap de la ceinture (montrer les éléments). Comme ceci vous pouvez repérer vos réglages avant de l'installer. En général, il vaut mieux desserrer un peu les straps des bretelles pour l'enfiler facilement.

(Installation commentée)

Ensuite, l'installation, c'est à peu près comme un sac à dos, on enfile la première bretelle, on peut pousser le bas dans le dos pour avoir la deuxième bretelle plus facilement (gestes). Ensuite : placer la ceinture **au-dessus de votre ceinture** et strap (geste). Ensuite, pour mettre les bras, vous positionner votre main comme ceci ou comme cela (montrer) pour venir prendre le support, puis on vient tout de suite prendre le support avec l'autre main pour dégager l'espace devant soi (gestes x 2). Je sers avec le strap, pas trop, c'est juste pour tenir.

(Ajustements/ contrôle)

Puis on ajuste (gestes de serrage ceinture/ bretelles/strap). Et voilà ! Là vous devez être confortable.

Sinon vous pouvez régler à nouveau affiner les réglages. L'exosquelette est correctement installé si :

- 1/La ceinture est au-dessus de sa propre ceinture
- 2/ pas de gêne pour la réalisation des gestes techniques dans l'enveloppe verte.

> sinon revoir la position de la base des tiges, la hauteur des tiges et les sangles d'écartement des tiges au-dessus de l'épaule.

- 3/ le support de bras est au milieu du bras > sinon varier la longueur du support de bras.
- 4/ la structure de l'épaule est alignée au-dessus de l'épaule : Il y a au moins l'espace de 2 doigts entre l'épaule et la structure au-dessus de l'épaule et alignement avec l'épaule.

> Sinon revoir la hauteur des tiges et le serrage des straps de l'ancrage à l'épaule.

(Perception de l'assistance)

Au niveau de l'assistance, lorsque vous avez les bras en bas, vous ne sentez pas d'assistance. Puis au fur et à mesure que vous montez les bras, vous allez sentir une poussée des bras vers le haut. Vous pourrez repérer à quelle hauteur vos bras sont totalement portés. Il est vraiment conçu pour aider sur cette plage (le formateur lève les bras doucement et montre les zones d'assistance). Il va être limité sur les gestes extrêmes en hauteur et en latéral.

(Désinstallation)

Ensuite, pour désinstaller, c'est exactement la même chose dans le sens inverse (gestes). On enlève le strap, on vient tout de suite prendre le support avec le bras pour relâcher doucement le support. Voilà ce qui arrive si on le fait trop rapidement (gestes). Puis on enlève le strap, ceinture, bretelles.

ANNEXE 7 - Commentaires sur les différences entre Exo A et Exo B (extrait)

Aspects Cognitifs et de l'Activité : maîtrise, concentration, qualité et performance perçue.

Globalement, les effets attendus suite aux améliorations sur le prototype le plus récent (Exo B) ne sont pas significativement visibles. Seuls la dimension 'Effort pour Maitriser' révèle une dégradation significative pour l'Exo B avec (+1.2/10 \pm 0.3, $p= 0.006$) qui signifie une demande de concentration plus élevée que pour l'Exo A.

Acceptation

Il n'y a pas de différence significative entre les deux prototypes sur le score d'acceptation global. Cependant on observe une différence significative sur l'une des 3 dimensions composantes. L'Exo B obtient un score plus important que l'Exo A concernant la recommandation à un collègue (+0.5/10 \pm 0.1, $p= 0.007$). On peut ajouter que même si le score de satisfaction globale est en moyenne proche entre les deux prototypes, les commentaires des participants ont rapporté des différences sur les critères de satisfaction : l'Exo B étant plus apprécié grâce à sa légèreté et sa possibilité de régler l'intensité de l'assistance et l'Exo A était préféré pour son installation plus facile, avec moins de réglages morphologiques.

Synthèse des résultats correspondant aux spécifications

Une synthèse des résultats est présentée dans la Table 16.

Table. 16. Hypothèses principales liées aux spécifications.

Spécifications	Exo A	Exo B	Hypothèses	Différence (Oui/Non ou non significatif)
Poids	3,5Kg	2,4Kg	Niveaux de pression : plus légers avec Exo B	Oui
			Pénibilité globale (solicitation cardiovasculaire) plus réduite avec Exo B	Oui
			Effort global perçu: plus réduit avec Exo B	Non
Structure (parties rigides)	Liaison rigide entre les lames ressorts	Liaison souple entre les lames ressorts, ressorts pivotants	Liberté de mouvement meilleure avec Exo B	Non
			Performance : plus d'actions et de signes valides avec Exo B	Non significatif
Gilet (parties souples)	Peu de parties souples	Parties souples plus importantes	Confort perçu: plus élevé avec Exo B	Non
Intensité de l'assistance	Non réglable	Réglable	Performance : meilleure avec Exo B	Non significatif
			Facilité d'utilisation perçue : meilleure avec Exo B	Non
			Effort global perçu: moins élevé avec Exo B	Oui
Nombre de réglages	6	10	Durée Installation : plus longue avec Exo B	Non
			Nombre de réajustements avant la tâche: plus nombreux avec Exo B	Oui

Titre : Apport des facteurs humains pour une meilleure intégration des exosquelettes dans l'industrie.

Mots clés : Exosquelette, Ergonomie, Ingénierie des Facteurs Humains, Assistance à l'opérateur

Dans l'industrie, certaines tâches manuelles favorisent des postures pénibles et répétitives. Dans ce contexte, les exosquelettes sont considérés comme une promesse technique intéressante pour soulager la pénibilité au travail, mais soulèvent plusieurs verrous relevant des facteurs humains. Il est donc indispensable de mesurer les bénéfices réels du port de l'exosquelette, et de comprendre les facteurs qui contribuent à son acceptation par les futurs utilisateurs. Les objectifs de cette thèse sont d'investiguer les effets du port d'un exosquelette, de mieux comprendre les facteurs d'acceptation des utilisateurs finaux ainsi que d'établir des règles et outils

repères pour une meilleure intégration des exosquelettes industriels. Ce travail de recherche présente l'étude des bénéfices d'un exosquelette passif, sur deux cas d'application industriels. Une démarche expérimentale centrée sur l'utilisateur permet d'identifier et de mesurer les facteurs d'acceptation de cette technologie. Des méthodes de mesures simples permettent de quantifier et de qualifier les bénéfices du port de l'exosquelette. L'importance de la phase de familiarisation et des supports employés est mise en valeur par des expérimentations. Ces résultats alimentent un travail de normalisation avec un groupe de travail pluridisciplinaire.

Title : Human Factors benefit for a better integration of exoskeletons in Industry.

Keywords : Exoskeletons, Ergonomics, Human Factors Engineering, Occupational assistive systems

In industry, several manual tasks engage painful and repetitive postures. In this context, exoskeletons are seen as an interesting technical promise to relieve arduous work, but raise several human factors issues. It is therefore essential to measure the real benefits of wearing an exoskeleton, and to understand the factors that contribute to its acceptance by future users. The objectives of this thesis are to investigate the effects of wearing an exoskeleton, to better understand the factors contributing to the acceptance of the exoskeleton by future users, and to develop a better understanding of the effects of wearing an exoskeleton by end-users as well as to suggest new rules and tools for a better

integration of industrial exoskeletons. This research work presents the study of the benefits of a passive exoskeleton, on two industrial case study. A user-centered experimental approach is used to identify and measure the acceptance factors of this technology. Simple measurement methods make it possible to quantify and qualify the benefits of wearing the exoskeleton. The importance of the familiarization phase and the support used is highlighted by experiments. These results contribute to a work of standardization with a pluridisciplinary workgroup.