



HAL
open science

Formalisation du problème de conception d'un exosquelette industriel et application à l'assistance aux efforts des membres supérieurs

Anthony Voilqué

► To cite this version:

Anthony Voilqué. Formalisation du problème de conception d'un exosquelette industriel et application à l'assistance aux efforts des membres supérieurs. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2020. Français. NNT : 2020CLFAC018 . tel-03022890

HAL Id: tel-03022890

<https://theses.hal.science/tel-03022890>

Submitted on 25 Nov 2020

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.



Université Clermont Auvergne

École Doctorale des Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse de doctorat

Formalisation du problème de conception d'un exosquelette industriel et application à l'assistance aux efforts des membres supérieurs

Présentée par
M. Anthony VOILQUÉ

Soutenue publiquement le 01/07/2020 devant le jury composé de :

M. Damien Chablat	Directeur de recherche, LS2N CNRS	Rapporteur
M. Manuel Paredes	Professeur d'Université, INSA de Toulouse / Institut Clément Ader	Rapporteur
M. Chedli Bouzgarrou	Professeur d'Université, SIGMA Clermont	Président
Mme. Serena Ivaldi	Chargée de recherche, LARSEN Inria Nancy Grand-Est	Examinatrice
M. Jean-Christophe Fauroux	Maître de conférences HDR, SIGMA Clermont / Institut Pascal	Co-directeur
M. Laurent Sabourin	Maître de conférences HDR, SIGMA Clermont / Institut Pascal	Co-directeur
M. Olivier Guézet	Lead manager FactoryBooster, Groupe PSA	Encadrant industriel

Université Clermont Auvergne - SIGMA Clermont

Institut Pascal, UMR 6602 CNRS/UCA/SIGMA Clermont, F-63171 Aubière, France

Résumé

Le secteur automobile, très compétitif, requiert une constante évolution des moyens de production. Au regard du nombre important de postes manuels, des efforts considérables sont mis en œuvre pour adapter les produits et les processus de fabrication afin de limiter les postes de travail dits "lourds" dont la charge physique est propice à l'apparition de maladies professionnelles.

Ce travail de thèse se focalise sur un nouveau type d'assistance avec le potentiel de soulager les opérateurs : les exosquelettes. Dispositifs d'assistance rigides ou souples portés par l'opérateur, ils proposent une alternative combinant la puissance mécatronique au très haut degré d'autonomie et à la dextérité humaine. Malgré un intérêt grandissant pour ces nouveaux dispositifs, ils sont encore peu utilisés du fait de leur complexité et faible adaptabilité. Une classification des besoins couplée à un état de l'art détaillé des technologies actuelles ainsi que des tendances ont mis en évidence certains verrous technologiques que nous essayons de lever. Nous proposons une démarche de formalisation permettant, à partir des besoins identifiés et des contraintes de l'environnement industriel, de produire un concept d'exosquelette pertinent.

Cette formalisation a ensuite été appliquée à un besoin représentatif présent sur les lignes d'assemblage véhicule, le clippage des garnitures de portières. Le type de contrainte identifié est celui de l'application d'un effort frontal au travers des membres supérieurs, dont il faut chercher à en réduire la charge physique.

Ce travail a mené à la réalisation de deux concepts brevetés : un concept d'architecture cinématique pour la structure de l'exosquelette assistant les membres supérieurs, ainsi qu'un concept de liaison pivot quasi-passive à blocage commandé permettant de bloquer et rigidifier la structure de l'exosquelette sur demande pour transmettre les efforts d'assistance.



Abstract

The automotive industry is a very competitive field, and requires constant improvements in production processes to match customers' expectations. A significant number of assembly steps remain manual, and despite considerable efforts to adapt the products or processes, some workstations remain physically stressful and may lead to occupational diseases.

This thesis focuses on a new type of assistive device to lower physical stress on operators : exoskeletons. Rigid or flexible wearable devices, they offer an alternative solution for physical assistance that combines mechatronic power with the human highly autonomous intelligence and dexterity. Despite the increasing interests for this technology, they are still not widely used do to their complexity and limited adaptability.

A categorization of needs linked to a detailed state of the art highlighted several technological locks that we then try to remove or avoid. To achieve this objective, we propose to portray the design process of a new exoskeleton through a formalization, from the industrial needs until a relevant exoskeleton concept.

This formalization have been applied to a recurring practical need from the automotive assembly lines, the clipping of door trim. The identified constraint concerns the application of a frontal effort using upper-limbs, where mechanical stress should be reduced.

This led us to two patented concepts : the concept of a kinematic architecture for an upper-limb exoskeleton structure, and the concept of a quasi-passive blocking joint that allows to fix and rigidify the exoskeleton structure to transmit assistive efforts.



Remerciements

Merci Estelle pour m'avoir lancé avec justesse dans un sujet pourtant très vaste au sein du Groupe PSA. Merci Olivier, tu m'as guidé pendant ces deux dernières années en trouvant toujours les mots justes et en me montrant que la prise de recul est maîtresse de sagesse.

Merci à mes directeurs de thèse Jean-Christophe et Laurent, pour m'avoir fait confiance et permis de participer à cette aventure.

Un grand merci à Manuel et Damien pour le temps consacré à la relecture de mon manuscrit, vos commentaires ainsi que nos discussions ont été très enrichissantes et j'espère avoir l'occasion de vous recroiser dans de nouvelles circonstances. Merci également à Chedli pour avoir dirigé la présentation en tant que président, et Serena pour ta participation comme examinatrice en laquelle je tenais beaucoup.

Je tiens à remercier le Groupe PSA pour son accueil, et plus particulièrement toute l'équipe Factory Booster avec qui j'ai partagé ces trois années. Bruno, Christophe, Eric, Fabien, Fabrice, Laurent, Loïc, Marc, Skander, Yohan, et tous les autres avec qui j'ai passé de bons moments de partage, autant professionnels qu'amicaux. Et tout particulièrement, merci Amélie. Nous avons avancé dans nos thèses ensembles, merci pour ton soutien quotidien. Tu as profondément influencé ces trois dernières années.

Merci à ma Maman, Dominique, ma grand-mère, qui ont su être là à tout instant et toujours de bons conseils chaque fois que j'en ai eu besoin.

Une pensée à mes amis aujourd'hui docteurs : Amélie qui a soutenu avec brio quelques semaines avant moi, Adrien qui m'a fait l'immense honneur d'attendre que je soutienne pour le faire à son tour le lendemain, Damien, Julien, Nolween, Elise et tous les autres. Mais aussi Amandine et Aimie qui sont sur le point de conclure leur aventure également et à qui je souhaite bon courage.

Un grand merci à mes amis, Adrien (encore), Cloé, Mathieu, Mehdi, Micka, Hélène, Romain, Shank, Thomas, Ugo, avec qui je passe toujours des moments incroyables et en qui j'ai toujours pu compter. Merci du fond du coeur.

Une mention très particulière à l'équipe de "G@merz" : Adrien (encore et toujours), Mehdi et Ugo, nos soirées sont devenues un rituel très cher à mes yeux et les prochaines nous réservent j'en suis sûr encore beaucoup de belles découvertes.

Et enfin merci à mon père, qui a su me donner le goût pour la mécanique et le travail manuel, et qui j'espère serait fier de voir la personne que je suis aujourd'hui.



SOMMAIRE

Introduction	1
1 Les besoins en assistance physique dans l'industrie manufacturière	3
1.1 Groupe PSA	4
1.1.1 L'automobile, un secteur en constante évolution	5
1.1.1.1 L'automobile de demain	5
1.1.1.2 Nouvelle compétition	6
1.1.2 Les enjeux de l'Usine du Futur	6
1.1.3 Factory Booster	7
1.2 Les Troubles Musculo-Squelettiques	8
1.2.1 Les principaux troubles musculo-squelettiques	8
1.2.2 Évaluation de la charge physique d'un poste	8
1.2.3 L'impact des TMS dans les métiers de la production automobile	9
1.3 Besoins en assistance physique	10
1.3.1 Les métiers clés des lignes de production	10
1.3.2 Le choix des exosquelettes	13
1.3.3 Catégorisation des besoins	15
1.3.3.1 CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement	15
1.3.3.2 CU_2 : Port/manutention de charges lourdes	16
1.3.3.3 CU_3 : Application d'efforts d'assemblage	17
1.3.4 D'autres secteurs concernés par ces besoins	18
1.4 Conclusions du contexte	19
2 Positionnement de la thèse	20
2.1 Évolution et applications des exosquelettes	21
2.2 Présentation des exosquelettes industriels	24
2.2.1 Génération de couple au niveau de la hanche	24
2.2.2 Génération de couple au niveau du genou	25
2.2.3 Génération d'effort au niveau de l'épaule	26
2.2.4 Mécanismes à compensation de charges	27
2.2.5 Génération d'un effort appliqué à l'environnement	29
2.2.6 Reprise d'effort par appuie rigide	29
2.2.7 Multi-assistances	30
2.3 Les technologies associées aux exosquelettes industriels	31
2.3.0.1 Les exosquelettes rigides	32
2.3.0.2 Les exosquelettes souples	34
2.4 Proposition de classification	35

2.5	Choix d'un cas d'étude	41
2.5.1	La problématique d'application d'efforts	41
2.5.2	Description du poste sélectionné	41
2.6	Déploiement de la technologie exosquelette	43
2.6.1	Évaluation et outils de mesure	43
2.6.1.1	Outils de mesure objectifs	43
2.6.1.2	Simulation	46
2.6.1.3	Outils de mesure subjectifs	47
2.6.2	Protocoles de mesure	47
2.7	Objectifs de thèse	49
2.8	Conclusions du positionnement	50
3	Formalisation du problème de conception d'un exosquelette destiné à l'industrie	51
3.1	Identification des règles de conception	53
3.1.1	L'impact	53
3.1.1.1	Efforts néfastes	53
3.1.1.2	Compatibilité entre l'exosquelette et le porteur	54
3.1.2	L'appropriation	54
3.1.2.1	Prise en main rapide	55
3.1.2.2	Hygiène	55
3.1.2.3	Ajustement aux morphologies	55
3.1.3	L'utilité	55
3.1.3.1	Perturbations des étapes du process	55
3.1.3.2	Maintenance	56
3.1.4	L'utilisabilité	56
3.1.4.1	Facteurs thermiques	56
3.1.4.2	Encombrement	56
3.1.4.3	Dextérité	57
3.1.4.4	Manipulation des réglages	57
3.1.5	Sécurité	58
3.2	Formalisation du processus de conception	58
3.2.1	Spécifications du besoin	61
3.2.2	Identification de la chaîne de transmission d'efforts	62
3.2.3	Choix du type de fonctionnement	65
3.2.4	Choix du modèle cinématique humain de référence	67
3.2.4.1	Morphologie du coude	67
3.2.4.2	Morphologie de l'épaule	68
3.2.4.3	Simplification du modèle de la ceinture de l'épaule	69
3.2.4.4	Schéma cinématique global du membre supérieur	70
3.2.5	Étude des liaisons d'interaction entre exosquelette et porteur	71
3.2.6	Localisation l'exosquelette sur son porteur	73
3.2.7	Proposition d'une cinématique isostatique	75
3.2.8	Compatibilité morphologique	82
3.2.9	Optimisation du placement des liaisons d'interaction	87
3.2.10	Proposition d'un modèle de raideur de l'exosquelette	87
3.2.10.1	Modèle de Denavit-Hartenberg	87
3.3	Conclusions de la formalisation	88
4	Synthèse dimensionnelle	89
4.1	Réalisation de la liaisons bloquante pilotée	90
4.1.1	Cahier des charges	90

4.1.2	Solutions technologiques	92
4.1.2.1	F1 : Guider en rotation deux mobiles	92
4.1.2.2	F2 : Bloquer la rotation de la liaison	93
4.1.3	Proposition d'un concept adapté de la roue libre	97
4.1.3.1	Description du fonctionnement des roues roue libres usuelles	98
4.1.3.2	Contact de Hertz	99
4.1.4	Dimensionnement de la liaison bloquante	104
4.1.4.1	Paramétrisation	104
4.1.4.2	Conditions d'arc-boutement	105
4.1.4.3	Pressions de contact	105
4.1.5	Dimensionnement du prototype de liaison bloquante	106
4.2	Conception de la structure d'essai	106
4.2.1	Prototypage de la structure exosquelette	107
4.3	Conclusions de la partie expérimentale	109
	Conclusions et perspectives	110
	Liste des publications	115
	Annexes	128
	A Grille d'évaluation de poste RULA	128
	B Mises en plan des pièces du prototype de liaison blocante	129

Table des figures

1.1	Résultats des vente du Groupe PSA pour l'année 2018	4
1.2	Les concepts fondateurs de l'automobile actuelle	5
1.3	Écosystème de l'entité Factory Booster	7
1.4	Les Troubles Musculo-Squelettiques indemnisés par le régime général en France [1, 2] .	9
1.5	Répartition moyenne de la masse salariale en % entre les différents métiers de la production	10
1.6	Exemples de postes de la ligne d' <i>Emboutissage</i>	11
1.7	Exemples de postes de la ligne de <i>Ferrage</i>	12
1.8	Exemples de postes de la ligne de <i>Peinture</i>	12
1.9	Exemples de postes de la ligne d' <i>Assemblage</i>	13
1.10	Utilisation d'un bras Universal Robot sur un poste d'assemblage du groupe PSA, usine de Sochaux. Le robot réalise plusieurs vissages sur les ailes, aux cotés de deux opérateurs qui partagent l'espace de travail.	14
1.11	Exemple de Skillet à hauteur variable, largement employé au sein du groupe PSA.	14
1.12	Algorithme de classification des besoins	15
1.13	Exemples de postes nécessitant un maintien/mouvement contraignant	16
1.14	Exemples de postes avec du port et de la manipulation de charges lourdes	17
1.15	Exemples de postes nécessitant l'application d'un effort d'assemblage	18
1.16	Illustrations de besoins dans des secteurs autres que l'automobile	19
2.1	Évolution des premiers concepts d'exosquelettes.	22
2.2	Exosquelettes d'assistance médical.	23
2.3	Exemples d'exosquelettes d'assistance destiné au soldat.	23
2.4	Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, transmission ventrale .	25
2.5	Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, transmission dorsale .	26
2.6	Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, actionnement dorsal actif.	26
2.7	Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, actionnement dorsal souple.	27
2.8	Exosquelette d'assistance à la flexion des jambes : <i>Keegoo</i> , B-Temia [3]	27
2.9	Exosquelettes d'assistance à l'élévation et maintien des bras en l'air.	28
2.10	Exosquelettes d'assistance au port de charge par compensation de poids	28

2.11	Exosquelettes d'assistance à l'application d'effort sur l'environnement	29
2.12	Support d'effort.	30
2.13	Exosquelettes multi-assistances.	31
	33figure.caption.39	
2.15	Exemples d'exosquelettes souples actifs	36
2.16	Répartition des exosquelettes industriels existants	37
2.17	Configuration de l'opérateur lors de l'application de l'effort nécessaire au clipsage des garnitures de porte	42
2.18	Exemple d'utilisation des centrales inertielles TEA Captiv pour le suivi d'activité des membres supérieurs	44
2.19	Exemples de moyens de capture d'efforts	45
2.20	Utilisation des capteurs SEMG pour le suivi d'activité des membres supérieurs lors de tâches bras en l'air	46
2.21	Logiciels de simulation de modèle humain	47
2.22	Phases de test pour de déploiement d'exosquelettes à PSA [4]	48
3.1	Formalisation des étapes de proposition d'un concept d'exosquelette industriel	59
3.2	Guide interne pour les amplitudes articulaires, basé sur la NF EN 1005. En vert sont les amplitudes conseillées, en jaune les amplitudes à éviter, et en rouge les amplitudes à proscrire.	61
3.3	Représentation des chaînes d'efforts possibles lors de l'utilisation d'un exosquelette. Graphes de connections : Les bulles colorées en rouge représentent les zones du corps sous charge. En vert sont les zones du corps soulagées par l'assistance. Les liaisons oranges symbolisent le chemin parcouru par les forces d'assistance et de réaction. Schémas : Les attaches de maintien en position de l'exosquelette sur le corps du porteur sont représentées en gris. Toutes les interfaces à travers lesquelles des efforts transitent sont colorées en orange.	63
3.4	Algorithme de sélection de la chaîne de transmission d'effort	64
3.5	Représentation du fonctionnement du concept d'exosquelette proposé. En vert sont les efforts d'assistance, ou rouge les efforts de réaction	66
3.6	La liaison du coude [5]	67
3.7	Complexe de l'épaule	68
3.8	Exemples de modèles d'épaules complexes dans la littérature; a.[6], b.[7], c.[8], d.[9], e.[10].	69
3.9	Simplification du complexe de l'épaule [11]	70
3.10	Dimensions du modèle de référence humain pour un homme moyen	71
3.11	Qualification des liaisons type pivot et linéaire-annulaire. a) Paramétrisation, b) Linéaire annulaire, c) Pivot, d) Pivot.	72
3.12	Liaison d'interaction type linéaire annulaire	73
3.13	Représentation des volumes d'encombrement potentiels autour du porteur de l'exosquelette	74
3.14	Visualisation de l'encombrement autorisé pour la conception de l'exosquelette. Les zones vertes représentent les espaces que la structure de l'exosquelette peut occuper. Les bleues doivent être laissées libres pour ne pas gêner le porteur dans ses tâches.	75

3.15	Représentation en graphe des liaisons	76
3.16	Représentation du problème de couplage entre deux chaînes sérielles, selon N. Jarassé dans [12]	77
3.17	Modélisation du problème de recherche d'une structure cinématique	78
3.18	Modèle cinématique mono-bras	79
3.19	Chaîne raccourcie entre le bras gauche H_{3g} (bâti) et le bras droit H_{3d} (organe terminal) pour le calcul d'un mécanisme simplifié inter-épaules.	80
3.20	Formalisation cinématique du problème de recherche des liaisons d'interaction LI du bras droit.	81
3.21	Modèle cinématique isostatique bi-bras global	82
3.22	Cinématique de la structure dorsale	83
3.23	Modèle cinématique bi-bras	84
3.24	Longueur des parties dorsales	85
3.25	Représentation schématique de l'épaule pour le calcul du déphasage minimum α_e . Avec e_{br} l'épaisseur de tissus mous maximal entre l'axe longitudinal du bras et sa surface, e_{ep} la hauteur entre l'axe passant par les centres de rotation des épaules et le sommet des épaules, e_{te} la distance entre le centre de rotation de l'épaule et la tête.	86
3.26	Modèle cinématique paramétré complet de la structure, avec $d_4 = \sin(\alpha_e) * l_{41}$	86
3.27	Modèle de Denavit-Hartenberg de l'exosquelette proposé	87
4.1	Simulation de la structure mono-bras sous ADAMS	91
4.2	Diagramme des flux de la liaison blocante	92
4.3	Diagramme FAST de la Fonction 1 : Guider en rotation un segment A par rapport à un segment B	93
4.4	Diagramme FAST de la Fonction 2 : Piloter le DDL en rotation de la liaison entre le segment A et le segment B	93
4.5	Exemples de blocage en rotation par friction	94
4.6	Frein électromagnétiques Miki Pulley [13]	94
4.7	Transmission par engrenage	95
4.8	Couplage par arbre cannelé, NF E 22-131	96
4.9	Embrayage à denture axiale Unicum [14]	96
4.10	Principes de roues libres uni-directionnelles. En prenant le noyau comme référence fixe au bâti, la rotation est bloquée dans le sens anti-horaire.	97
4.11	Roue libre bidirectionnelles pilotée manuellement par un levier, de la marque SIAM RINGSPANN S.A	97
4.12	Cas standard d'une roue libre à un mobile	98
4.13	Description du contact de Hertz [15]	99
4.14	Schéma cinématique du concept de liaison blocante pour une paire de galets : la <i>cloche</i> 1, le <i>noyau</i> 2, les <i>galets</i> 3 et la <i>couronne</i> 4.	100
4.15	Composition de la liaison blocante proposée	101
4.16	Représentation et fonctionnement des galets montés en opposition	102
4.17	Positions de fonctionnement des <i>galets</i>	102
4.18	Conditions géométriques du concept de liaison blocante	103

4.19	Paramétrisation géométrique du mécanisme de blocage par arc-boutement	104
4.20	Modélisation du prototype de liaison blocante sous Catia V5	107
4.21	Modélisation des pièces de la structure de l'exosquelette	107
4.22	Photo du prototype porté	108

Liste des tableaux

2.1	Liste d'exosquelettes industriels disponibles sur le marché ; Masse (kg), Structures (R=rigide, S=souple), CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement, CU_2 : Port/manutention de charges lourdes, CU_3 : Application d'effort d'assemblage	38
2.2	Liste d'exosquelettes industriels disponibles sur le marché ; Masse (kg), Structures (R=rigide, S=souple), CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement, CU_2 : Port/manutention de charges lourdes, CU_3 : Application d'effort d'assemblage	39
2.3	Besoins exprimés par les ergonomes concernant les postes de la ligne de Montage, par ordre décroissant d'importance.	41
2.4	Liste des tâches annexes du poste sélectionné, mises en relation avec leurs contraintes principales associées	42
2.5	Comparatif des outils de mesure objectifs les plus courants	46
3.1	Liste des règles de conception	60
3.2	Labélisation des zones d'encombrement autour du porteur	73
3.3	DDL possibles pour les liaisons d'interaction	79
3.4	Propositions de cinématique pour relier les bras droit et gauche de l'exosquelette	80
3.5	Tableau des paramètres du modèle de Denavit-Hartenberg	87
4.1	Liste des efforts pour chaque liaison du demi-exosquelette étudié	91
4.2	Cahier des charges de la liaison bloquante	92
4.3	Paramètres géométriques du concept de liaison pivot blocante	104

Introduction

Un point d'honneur est apporté à l'amélioration des conditions de travail, et les sites de production industrielle sont particulièrement concernés. Aujourd'hui encore de nombreuses tâches sont réalisées manuellement par des opérateurs qualifiés, sur les lignes d'assemblage notamment. Les cadences importantes et la qualité de produit recherchée par les clients imposent une charge supplémentaire aux opérateurs, avec une concurrence toujours plus agressive sur le marché. Ce travail s'inscrit dans la continuité du projet "Usine du Futur". Les lignes de production sont amenées à subir de grands changements fonctionnels dans les prochaines années. Elles permettront notamment de s'adapter aux cadences de production, produiront une plus grande variété de modèles, seront compactées et optimisées. L'un des critères les plus importants de ce type d'installation est la flexibilité. Les questions de reconfigurabilité du moyen de production font l'objet de nombreuses recherches, et il devient nécessaire d'avoir un outils de production modulaire.

Malgré les efforts considérables mis en oeuvre pour adapter les produits et les processus de fabrication pour respecter les recommandations ergonomiques et de santé, il reste encore des postes de travail requérant une forte dépense énergétique et potentiellement source de maladies professionnelles. Des solutions d'assistance existent, mais ne conviennent pas ou plus au système de production à venir. Les exosquelettes promettent un nouveau type d'assistance, personnalisé et adaptable, dont l'intégration en milieu industriel sera moins contraignante et coûteuse que les assistances usuelles. Mais les tests réalisés montrent des résultats mitigés, et soulèvent des points bloquants récurrents qu'il faudra lever pour assurer la pérennité de telles assistances dans le contexte de production automobile.

Le premier chapitre contextualise le milieu industriel dans lequel cette étude prend place, celui de la production automobile du Groupe PSA. Les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) constituent aujourd'hui la première cause de maladies professionnelles, et l'industrie est un secteur cumulant de nombreux facteurs aggravants. Certains métiers clés de la production automobile, et notamment le montage, sont encore majoritairement manuels. Nous proposons de classer les problématiques nécessitant l'assistance d'un exosquelette en trois catégories. Chacune d'entre elle est détaillée et illustrée avec des exemples types de postes concernés.

Le deuxième chapitre présente une vue d'ensemble de la technologie des exosquelettes destinés à un usage en milieu industriel. A partir de l'état de l'art réalisé, plusieurs grands axes de technologies employées ont été identifiés et décrits. Pour assister le processus de sélection des exosquelettes, et permettre d'observer la répartition et l'évolution du marché existant, nous proposons une classification pour les 75 dispositifs identifiés. Ils sont classés selon les données constructeurs (fabricant, pays d'origine), leur poids, les membres concernés par l'assistance, le type de structure employée, le fonc-

tionnement et pour finir le ou les cas d'usages auquel(s) ils se destinent. Des tendances technologiques apparaissent, et certains cas d'usage se retrouvent être sur-représentés. Un cas d'usage représentatif des lignes de montage du Groupe PSA est sélectionné en conséquence, possédant une problématique d'assistance qui aujourd'hui n'a aucune solution adaptée. Nous détaillons ensuite les étapes nécessaires à la validation de telles solutions d'assistance, ainsi que les outils à disposition.

Le troisième chapitre présente la formalisation du problème de conception d'un exosquelette innovant. Des règles de conception sont détaillées pour ensuite être intégrées dans une méthodologie globale. Le but est de pouvoir obtenir un concept et un prototype d'exosquelette adapté à un usage dans l'industrie de production en minimisant le nombre d'itérations. Pour cela, une séquence ordonnée d'étapes clés met en évidence les différentes phases nécessaires à la construction du concept d'exosquelette. Pour chacune des étapes, les règles de conception sont incorporées garantissant que les choix s'accordent avec les contraintes initiales. Au fur et à mesure, la méthodologie est appliquée au cas d'usage sélectionné pour finalement aboutir sur un concept d'exosquelette innovant, composé d'une structure associée aux membres supérieurs et se rigidifiant à l'aide de liaisons bloquantes quasi-passives.

Le quatrième chapitre détaille la conception des différents prototypes produits durant la thèse. Tout d'abord, une liaison quasi-passive nécessaire au fonctionnement de l'exosquelette est proposée. Les produits disponibles sur le marché ne convenant pas, un concept adapté de la roue libre pilotable est développé et dimensionné. Puis, une première version de la structure exosquelette est présentée. Dimensionnée comme une version d'essai, elle est réalisée en impression 3D plastique et permet de donner un aperçu de l'appropriation d'une telle structure.

Les besoins en assistance physique dans l'industrie manufacturière

Sommaire

1.1	Groupe PSA	4
1.1.1	L'automobile, un secteur en constante évolution	5
1.1.1.1	L'automobile de demain	5
1.1.1.2	Nouvelle compétition	6
1.1.2	Les enjeux de l'Usine du Futur	6
1.1.3	Factory Booster	7
1.2	Les Troubles Musculo-Squelettiques	8
1.2.1	Les principaux troubles musculo-squelettiques	8
1.2.2	Évaluation de la charge physique d'un poste	8
1.2.3	L'impact des TMS dans les métiers de la production automobile	9
1.3	Besoins en assistance physique	10
1.3.1	Les métiers clés des lignes de production	10
1.3.2	Le choix des exosquelettes	13
1.3.3	Catégorisation des besoins	15
1.3.3.1	CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement	15
1.3.3.2	CU_2 : Port/manutention de charges lourdes	16
1.3.3.3	CU_3 : Application d'efforts d'assemblage	17
1.3.4	D'autres secteurs concernés par ces besoins	18
1.4	Conclusions du contexte	19

Les TMS (Troubles Musculo-Squelettiques) sont aujourd'hui les maladies professionnelles les plus répandues [16]. Et si c'est le cas pour la plupart des secteurs nécessitant un travail manuel, ceux de l'industrie sont représentatifs. La raison principale est qu'ils combinent la plupart des facteurs aggravants reconnus. L'impact sur la vie personnelle des opérateurs, mais aussi les conséquences sur l'organisation professionnelle font que les TMS représentent un enjeu fort. L'objectif premier de l'ergonomie est d'adapter le travail à l'homme, en s'intéressant aux conditions de réalisation des opérations. Au sein du Groupe PSA, des actions santé, structurées et pluridisciplinaires, ont été mises en oeuvre pour identifier et diminuer le nombre de maladies professionnelles. Le déploiement généralisé de cette démarche couplé à une étude ergonomique poussée des postes sur les lignes de production ont permis d'identifier les sources potentielles d'apparition de maladies professionnelles.

Ce premier chapitre présente tout d'abord le Groupe PSA ainsi qu'un aperçu des enjeux de l'industrie automobile. Nous introduisons ensuite le problème des TMS, très présents dans l'industrie et qui sont corrélés au contexte de production grande série. Ensuite, nous présentons les besoins en assistance physique identifiés et quelques solutions permettant de réduire la charge physique des opérateurs lorsque ceci est nécessaire.

1.1 Groupe PSA

Le Groupe PSA est initialement né de la fusion entre Peugeot SA et Citroën SA en 1976. En 2014, DS Automobiles devient la troisième marque du groupe, suivi du rachat d'Opel et Vauxhall en 2017. Aujourd'hui, le Groupe PSA compte plus de 211 000 collaborateurs dans le monde. Acteur historique en Europe, la société se positionne comme le deuxième constructeur automobile avec 3,106 millions de véhicules vendus en 2018 pour un chiffre d'affaire de 74 milliards d'euros (Fig. 1.1).

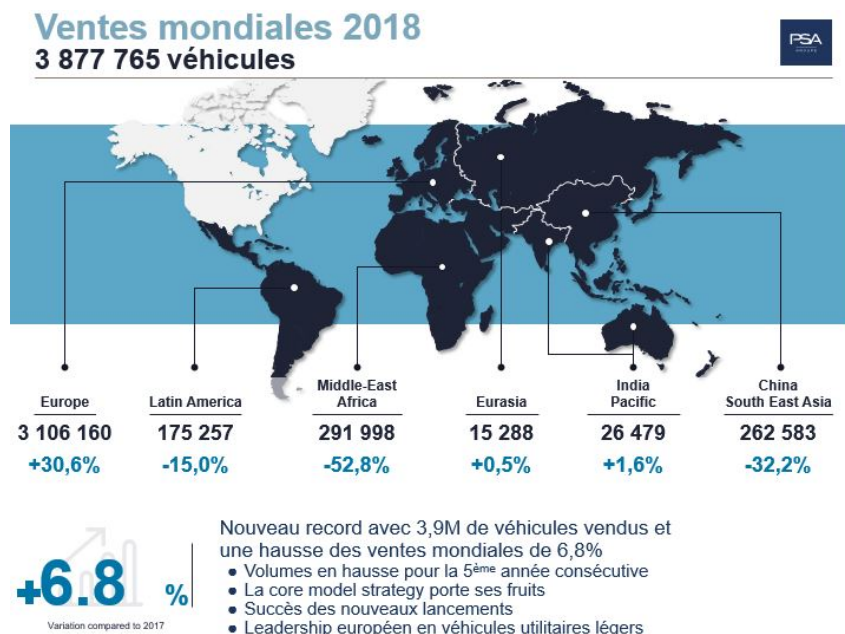
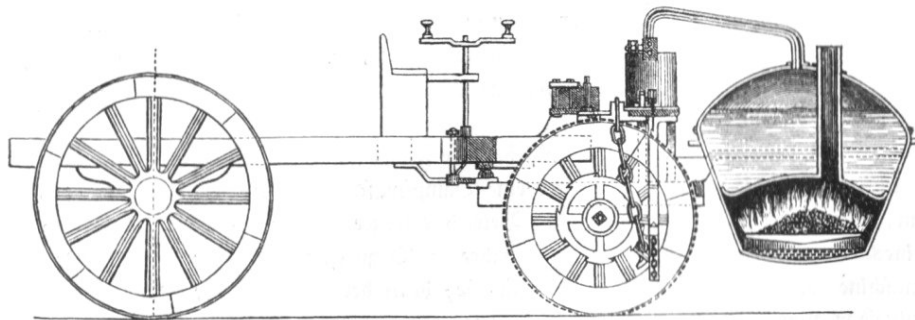


FIGURE 1.1 – Résultats des vente du Groupe PSA pour l'année 2018

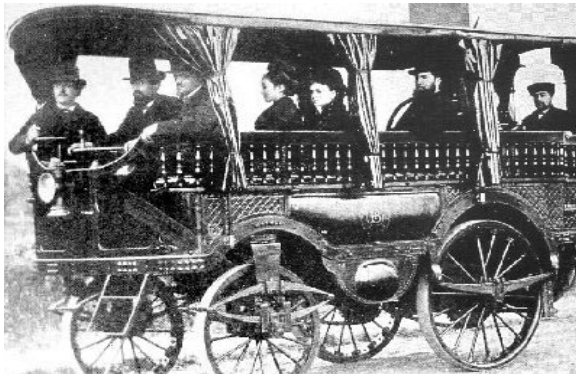
Malgré une présence mondiale, le Groupe PSA reste attentif aux évolutions du marché et à l'arrivée de nouvelles concurrences venues des pays du sud-est et du marché de la voiture électrique.

1.1.1 L'automobile, un secteur en constante évolution

L'Europe est le berceau de l'industrie automobile, avec aujourd'hui près d'un tiers des emplois liés à ce secteur. La première voiture, vieille de près de 240 ans, n'était qu'un produit de niche (Fig. 1.2a). Peu de personnes voyaient en elle une utilité. Comme le prônait le dernier Kaiser allemand Wilhelm II, "L'automobile n'est qu'un phénomène passager, je crois dans les chevaux". Pourtant, elle a bien révolutionné le transport (Fig. 1.2b). Depuis, l'Europe a mis le monde sur roues (Fig. 1.2c) et les voitures et leurs technologies se vendent tout autour du globe. L'industrie automobile s'est étendue et a prospéré, devenant aujourd'hui un acteur essentiel de l'industrie européenne.



(a) Le Fardier (vapeur, 2 pers.), de l'ingénieur français Joseph Cugnot en 1769.



(b) L'Obéissante (vapeur, 12 pers.), du français Amédée Bollée en 1873.



(c) Le tricycle Benz (moteur à explosion, 2 pers.), de l'allemand Karl Benz en 1886.

FIGURE 1.2 – Les concepts fondateurs de l'automobile actuelle

1.1.1.1 L'automobile de demain

Cependant, la voiture est en train d'être réinventée. Le développement durable prend une part de plus en plus importante dans sa conception, elle devient intelligente et se partage. Mais ces changements vont de pair avec de nouveaux défis. Le marché évolue vers des véhicules éco-durables, et les constructeurs doivent s'adapter. Les ventes de voitures électriques ne cessent d'augmenter, et une nouvelle gestion du parc véhicule doit être mise en place pour assurer le suivi logistique.

Les véhicules deviennent intelligents et autonomes grâce à des capteurs embarqués et des outils informatiques d'Intelligence Artificielle. Ne plus uniquement s'appuyer sur le conducteur pour le contrôle du véhicule a pour objectif premier de réduire le nombre de morts sur la route. Mais cela permettra également de réguler la circulation, éviter les bouchons, et de transformer les trajets en temps libre. Les

atouts de vente des véhicules seront les activités proposées dans l'habitacle.

La voiture devient de plus en plus "intelligente", se connecte mais aussi se partage. Désormais, les voitures sont gérées au sein d'un réseau, tout comme les transports en commun ou les vélos. Des modèles économiques originaux émergent, proposant de nouveaux services et applications qui complètent et renouvellent le marché de la mobilité. Au final, le transport pour particulier se vendra en kilomètres et non plus en véhicules. Les habitudes changent aussi, pour des raisons démographiques mais aussi culturelles. Les nouvelles générations, plus urbaines, n'ont plus le même attrait de posséder un véhicule personnel. Les problèmes de stationnement ou d'assurances sont autant de freins à l'achat d'un bien restant garé 95% du temps.

1.1.1.2 Nouvelle compétition

Avec ces trois enjeux, la compétition internationale fait rage et met au défi les manufacturiers européens. De nouveaux compétiteurs font leur place dans la course. Tesla, leader nord-américain dans les voitures haut de gamme électriques, entre sur le marché de masse avec leurs derniers modèles proposés à un prix abordable. A tout cela s'ajoutent des starts-up et fournisseurs de services comme Uber ou Lyft qui proposent de nouvelles approches sur l'utilisation de flottes de véhicules.

L'Europe fait face à deux fronts simultanément. A l'Ouest, le trio Tesla-Google-Uber représente les trois approches associées à la voiture du futur : une voiture électrique (Tesla), autonome (Google) et proposée au travers d'un service de mobilité (Uber). La situation à l'Est est similaire. Les acteurs géants de la technologie comme Baidu et Alibaba se lancent dans les voitures autonomes, et les services comme Didi Chuxing (Uber chinois) sont en pleine expansion. Selon la société de conseil McKinsey [17], la Chine a produit près de 50% des 873.000 véhicules électriques construits en 2016. De plus, la Chine, la Corée du Sud et le Japon sont leader des technologies liées aux batteries. La Chine développe également sa capacité de production de batterie, rendant dépendante l'Europe qui est en retard dans ce domaine.

L'Europe reste toutefois le berceau de l'industrie automobile, mais ce secteur a subi de nombreuses modifications en profondeur. Les voitures sont réinventées, et les nouveaux acteurs agitent le marché.

1.1.2 Les enjeux de l'Usine du Futur

Pour le Groupe PSA, l'usine du futur est compacte, économique et écologique, tout en étant flexible et agile [18].

L'évolution des technologies et des attentes des clients, couplée à la pression des marchés, conduisent à rechercher l'optimisation permanente des processus industriels. Améliorer la performance de la chaîne logistique et des usines est un impératif absolu pour réduire les coûts et offrir au plus grand nombre des véhicules innovants, de qualité et livrés dans les délais. Dans ce contexte, « l'usine excellente » du Groupe PSA entend consolider le meilleur des technologies, des équipements et des savoir-faire du Groupe et de ses partenaires.

L'innovation se met au service des processus. Les espaces de travail sont organisés autour de solutions d'automatisation innovantes afin d'améliorer l'ergonomie des postes et la sécurité des salariés. Les contrôles qualité sont effectués automatiquement avant d'être validés par les opérateurs. Toutes les informations des robots et des équipements sont stockées, analysées et échangées en temps réel afin d'assurer un suivi optimum.

Le système de production peut être évalué par différents critères : un chargement de ligne optimisé

en la compactant, une meilleure flexibilité des moyens de production pour s'adapter aux variations de la demande, un management autonome pour améliorer les processus, et l'intégration complète des fournisseurs dans la chaîne d'approvisionnement.

L'objectif principal de "l'usine Excellente" est de créer une dynamique opérationnelle en vue d'améliorer la performance industrielle du Groupe. L'un des objectifs est la réduction du coût de fabrication des véhicules, notamment en modernisant et en compactant les lignes de production.

Le "Digital Manufacturing" joue un rôle essentiel dans la transformation des usines vers un objectif de compétitivité sur le marché européen. Conserver un taux d'emploi élevé tout en intégrant les dernières technologies du domaine de la robotique est un challenge. Pour y parvenir, il faut impliquer les ressources humaines de manière plus efficace pour améliorer leur motivation et engagement.

1.1.3 Factory Booster

Le plateau Factory Booster, dans lequel ont pris place ces travaux, est un lieu physique permettant d'accélérer les sujets pluridisciplinaires, transversaux et jugés prioritaires du programmes Usine du Futur. Il répond aux défis portés par les usines (Fig. 1.3). En fédérant toutes les parties prenantes, l'objectif est de réaliser des démonstrateurs proches de l'application ciblée. Sur le plateau, les compétences socles dans le domaine de la robotique et l'automatisation sont complétées par les compétences métiers et d'éventuels partenaires externes.

Le plateau Factory Booster est également le lieu de partage des besoins, exprimés dans le contexte technologique de chaque unité de production, et d'échanges avec les plateformes régionales en relation avec les bassins industriels.

Un des axes concerne l'intégration et le déploiement de solutions d'assistances portables, dont les exosquelettes font partie. Elles ont pour objectifs de simplifier et faciliter le travail des opérateurs, pour améliorer la qualité et réduire le nombre d'apparition de maladies professionnelles. Encore trop peu de solutions commerciales répondent correctement aux problématiques. Mon objectif au sein du plateau Factory Booster est de développer un type d'exosquelette répondant au mieux aux attentes et contraintes des postes pour lesquels il est destiné.

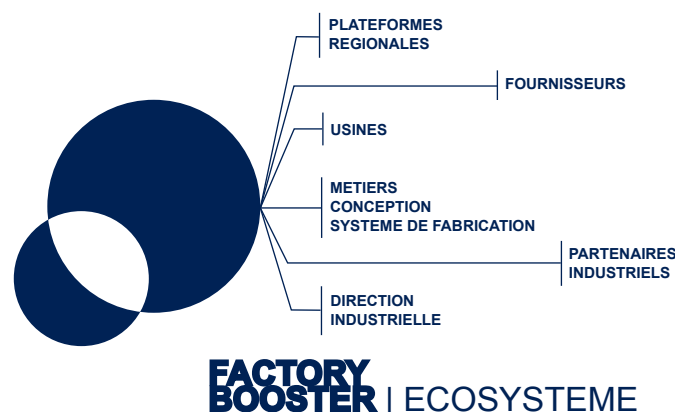


FIGURE 1.3 – Écosystème de l'entité Factory Booster

1.2 Les Troubles Musculo-Squelettiques

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) sont des lésions des tissus mous autour des articulations, comme les muscles, les tendons, le cartilage, les nerfs. Ils se manifestent par des douleurs, des pertes de force, des raideurs et peuvent conduire à des maladies chroniques générant des pertes de productivité.

Ils sont classés en tête des maladies professionnelles les plus fréquentes par plusieurs pays européens, et concernent 44 millions de travailleurs européens pour un impact estimé à plus de 240 milliards d'euros [19, 20]. C'est en partie le résultat du vieillissement de la population, combiné à l'intensification et l'accroissement des contraintes de productivité. Pour 62% des travailleurs européens, ce sont les mouvements répétitifs des membres supérieurs qui sont identifiés comme cause principale, suivi par les positions contraignantes pour 44% [21]. Les pays industrialisés ne sont pas les seuls touchés, et même si moins de données sont disponibles, les TMS affectent également les pays en voie de développement comme le Maghreb, l'Asie ou l'Amérique du Sud [22, 23, 24]. Les TMS touchent tous les secteurs, mais l'agroalimentaire, la métallurgie, le BTP et la construction automobile sont les secteurs les plus impactés. En 2012 les TMS ont engendré la perte de 10 millions de journées de travail et 1 milliard d'euros de frais couverts par les cotisations d'entreprise.

En 2016, 338 maladies professionnelles ont été déclarées pour le Groupe PSA [25]. Ce nombre comprend 78% de troubles musculo-squelettiques des membres supérieurs, 2% de troubles liés au port de charge, et le reste concerne l'environnement de travail ou d'autres causes diverses.

1.2.1 Les principaux troubles musculo-squelettiques

Près de 23% des travailleurs européens ont déclaré souffrir de douleurs à la nuque, aux épaules ou aux membres supérieurs [19]. Les troubles les plus fréquents concernent les membres supérieurs, avec le syndrome du canal carpien au niveau du poignet, le syndrome de la coiffe des rotateurs pour l'épaule ou bien l'épicondylite latérale du coude (Fig. 1.4). Leur gravité est directement liée aux conséquences médicales, qui aboutissent fréquemment à une perturbation des activités personnelles et une inaptitude au poste de travail. Pour les membres inférieurs, les cas de fatigue musculaire apparaissent lors de piétinement ou de posture statique. Des postures accroupies, genoux au sol ou flexions répétées peuvent accélérer l'apparition de pathologies.

1.2.2 Évaluation de la charge physique d'un poste

Différents facteurs influent sur la charge physique d'un poste, et sont identifiés comme étant potentiellement source d'apparition de TMS.

Les facteurs mécaniques sont les plus rapidement identifiables. Les efforts trop importants, les postures inconfortables ou prolongées, les mouvements répétitifs sont autant de causes potentiellement source de TMS. Les températures extrêmes et les vibrations sont également des conditions aggravantes. Pour assister l'évaluation de la charge physique de travail, des normes sont disponibles :

- NF X35-109, pour l'évaluation du port et de la manipulation de charges lourdes en fonction du poids, des mouvements et de la fréquence [26];
- NF EN 1005, pour l'évaluation des postures contraignantes et mouvements répétés [27];
- NF EN ISO 14738, pour le dimensionnement du poste de travail [28].

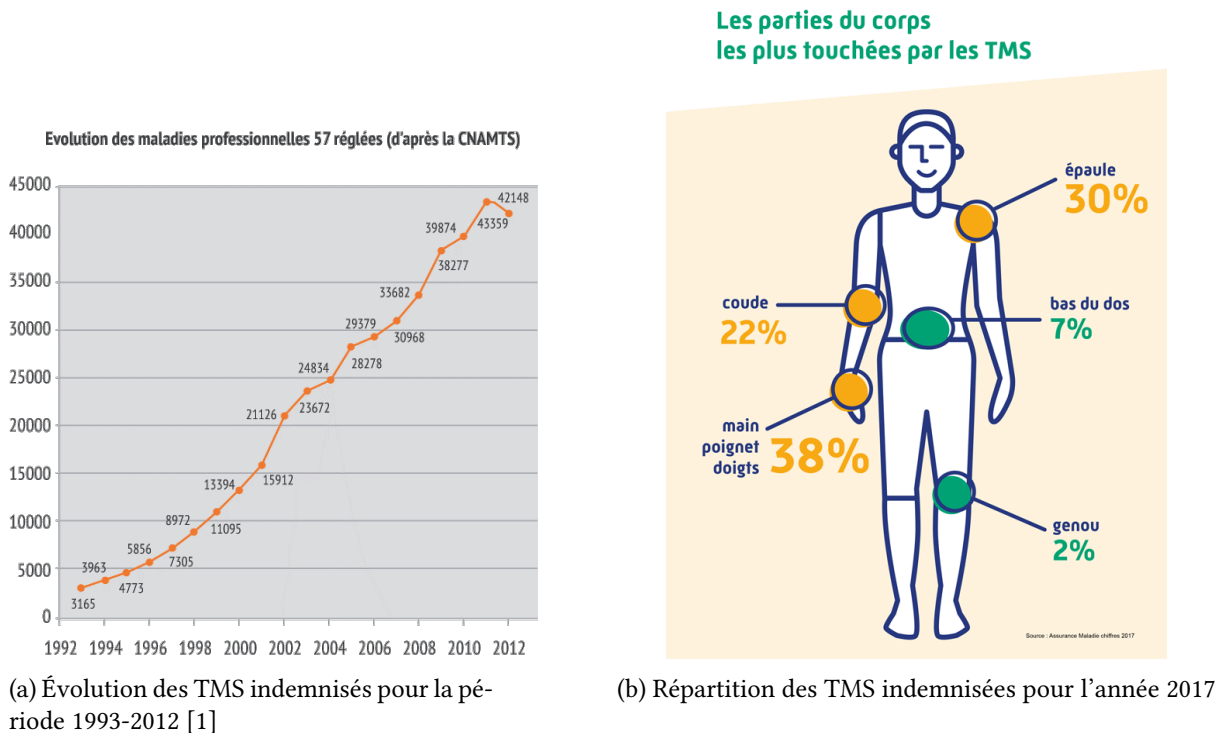


FIGURE 1.4 – Les Troubles Musculo-Squelettiques indemnisés par le régime général en France [1, 2]

Les facteurs psychologiques sont plus difficiles à identifier. Les problèmes d'organisation, le sentiment de dépréciation ou des conflits dans l'environnement peuvent aggraver les conditions de travail et engendrer l'apparition de TMS. Les facteurs individuels des opérateurs influencent également la déclaration des TMS. Son âge, son sexe, le fait qu'il soit déjà sujet à des pathologies chroniques peuvent fortement aggraver les risques d'apparition de TMS.

Pour qu'une évaluation de poste soit complète, elle doit donc prendre en compte le maximum de facteurs. Au sein du Groupe PSA, un système de cotation interne est utilisé : METEO (Méthode d'Évaluation du Travail Et de l'Organisation). Il est adapté du système de notation RULA (Rapid Upper Limb Assessment) dont la grille d'évaluation est présentée Annexe A. De la même manière, la cotation METEO utilise une grille de calcul pour évaluer le poste comme "Léger", "Moyen" ou "Lourd". Les postes "Lourds" sont la priorité des ergonomes, car ils sont les plus susceptibles d'être à l'origine de maladies professionnelles et notamment de TMS.

1.2.3 L'impact des TMS dans les métiers de la production automobile

Les conséquences des TMS impactent en premier lieu le travailleur qui les subit. Les douleurs et gênes provoquées ne s'arrêtent pas à l'environnement de travail, pouvant altérer la qualité de vie personnelle.

Les impacts sur l'organisation professionnelle sont néanmoins conséquents. On note par exemple une baisse de la productivité, de la qualité, mais aussi un plus fort taux d'absentéisme. Avec une tendance à devenir chroniques, il est important de les diagnostiquer et les prendre en charge le plus tôt possible.

1.3 Besoins en assistance physique

Un manuel d'ergonomie mis en place au sein du Groupe PSA permet de caractériser la charge des postes en fonction de plusieurs critères : la posture, la cadence, l'effort, la charge, la distance parcourue. Un processus d'évaluation ergonomique du poste est toujours mis en place pour détecter d'éventuelles surcharges. Le Taux de Fréquence (TF) des maladies professionnelles ($TF = \text{nombre de maladies professionnelles reconnues} / \text{nombre d'heures travaillées} \times 1\,000\,000$) mis en place à l'initiative du groupe PSA montre une réduction sensible partant de 3.89 en 2014, puis 3.46 en 2015, et finalement 2.79 en 2016 [25]. Les facteurs aggravants d'apparition des TMS s'ajoutent à la grande diversité de postes nécessaires à la production d'une voiture. La difficulté est de trouver un compromis entre la définition du produit, la faisabilité des processus et le confort de l'opérateur. Lorsque les limites de modification des processus sont atteintes, il devient impossible d'adapter la tâche à l'opérateur. Par conséquent, certains postes sont physiquement éprouvants. Les efforts intenses ou les postures inconfortables prolongées sont identifiés comme potentielles sources de TMS [29, 30].

1.3.1 Les métiers clés des lignes de production

La production d'une voiture comprend quatre grandes phases, similaires pour la plupart des constructeurs automobile (Fig. 1.5).

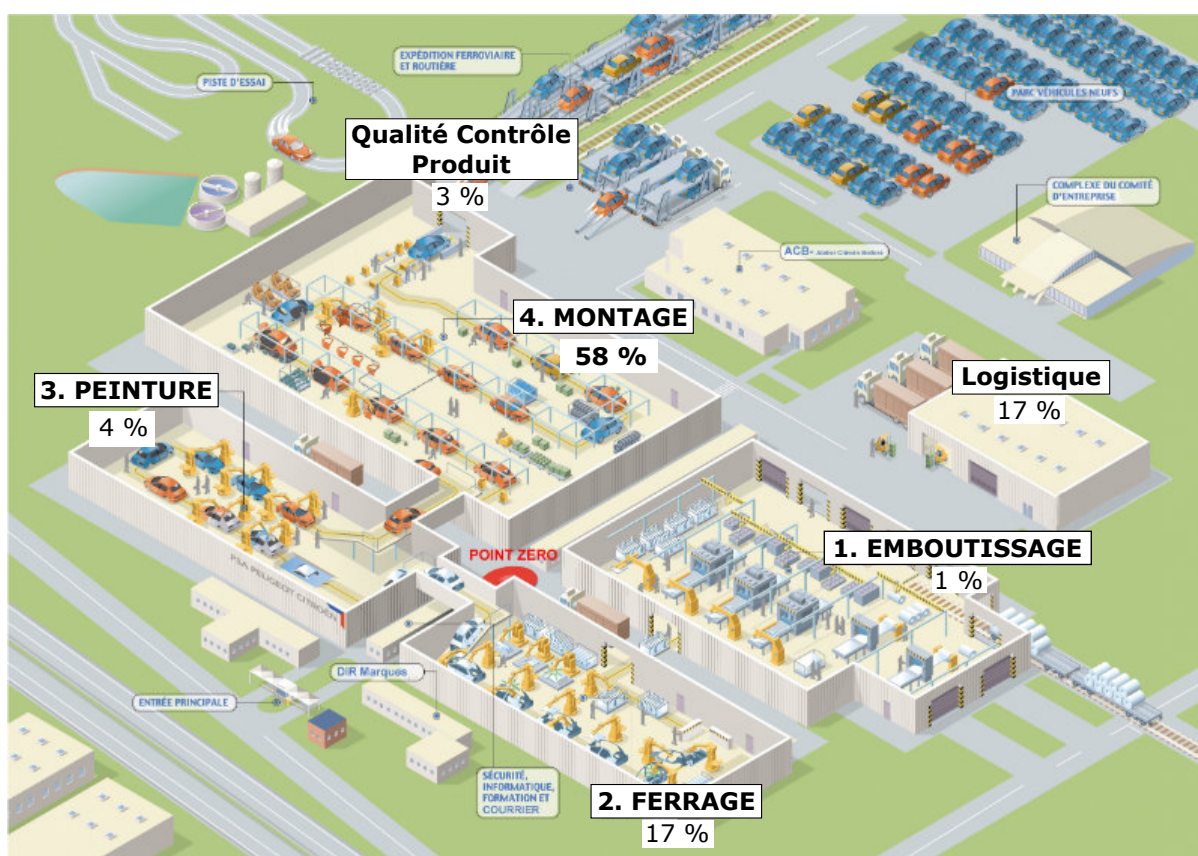


FIGURE 1.5 – Répartition moyenne de la masse salariale en % entre les différents métiers de la production

La première consiste à former les parties structurantes du châssis et de l'enveloppe de la voiture à partir de rouleaux de tôle, c'est la ligne d'*emboutissage*. La matière première sous forme de rouleaux

de tôle (Fig. 1.6a) est d'abord découpée (Fig. 1.6b). Les pièces sont ensuite transférées aux presses, où elles sont ensuite pliées et poinçonnées (Fig. 1.6). Le transport des pièces est souvent robotisé, mais certaines sont déplacées par manipulateur à ventouse ou à pince, ou bien simplement manuellement pour les plus petites.



(a) Approvisionnement en rouleaux de tôle brut, principale matière première



(b) Découpe automatisée des tôles par presse hydraulique



(c) Emboutissage des tôles

FIGURE 1.6 – Exemples de postes de la ligne d'Emboutissage

Ces pièces sont ensuite transportées à la ligne *ferrage*, où elles sont soudées et assemblées pour obtenir le châssis de la voiture. Mais si ces deux lignes sont largement automatisées (Fig. 1.7a), il subsiste des postes où l'homme est indispensable (Fig. 1.7b). C'est notamment le cas pour des opérations nécessitant une grande dextérité pour déplacer et positionner des pièces de forme complexe, avec si nécessaire l'emploi d'un équipement d'assistance physique. Cet environnement reste dangereux et source d'accident. La présence de pièces coupantes, encombrantes et lourdes imposent le port d'équipement de sécurité adaptés comme les gants, vêtements et lunettes. Les opérateurs sont souvent proches des cellules robotisées, protégées par des grilles métalliques. Les espaces de travail sont parfois réduits, lorsque les opérateurs sont encerclés par des cellules robotisées grillagées et les chariots d'approvisionnement de bord de ligne.

La troisième étape concerne la ligne *peinture*. Le châssis brut entier est d'abord plongé dans un bain primaire permettant de protéger le métal de la corrosion. Pour assurer l'étanchéité, des cordons de colle sont déposés à des emplacements stratégiques. La dépose de matière est automatisée, mais une étape de lissage est nécessaire pour rectifier le cordon. Cette tâche reste manuelle car elle demande beaucoup de dextérité et de savoir-faire. Ensuite, la caisse est peinte dans la couleur voulue (Fig. 1.8a). En fin de ligne,



(a) Poste automatisé de soudure de la caisse, site de Sevel-Nord



(b) Poste de montage des portes brutes sur la caisse avant peinture, site de Mulhouse

FIGURE 1.7 – Exemples de postes de la ligne de *Ferrage*

un contrôle qualité rigoureux permet de détecter et corriger d'éventuelles imperfections (Fig. 1.8b). Des opérateurs qualifiés sont chargés des reprises peinture.



(a) Poste robotisé de peinture de la caisse, site de Poissy



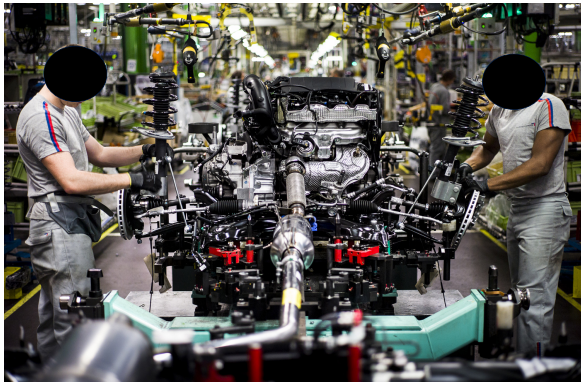
(b) Poste de contrôle qualité en fin de ligne *Peinture*, site de Mulhouse

FIGURE 1.8 – Exemples de postes de la ligne de *Peinture*

Les opérateurs sont la plupart du temps en contact direct avec la caisse de la voiture. Les règles de sécurité de travail imposent le port d'une tenue spécifique, limitant les risques d'endommager la peinture et le vernis même en cas de contact involontaire. La ligne de *peinture* possède l'environnement le plus contrôlé. Il est majoritairement automatisé, mais la dextérité humaine reste nécessaire pour de nombreuses tâches parfois physiques.

En parallèle, des usines mécaniques extérieures pré-assemblent le bloc moteur et les organes de transmission comme la boîte de vitesses et l'embrayage. Le châssis peint, le bloc moteur et les composants de la voiture se rejoignent au sein de la quatrième et dernière phase de production, la ligne d'*assemblage*. Là, les pièces fonctionnelles (Fig. 1.9a) et d'aspect (Fig. 1.9b) de la voiture sont montées au défilé, à un rythme constant fixé entre 30 et 60 véhicules/heure.

En sortie de la ligne d'assemblage terminale, les véhicules sont finalement réglés et vérifiés. Une fois tous les contrôles qualité validés, le véhicule rejoint la zone de stockage pour ensuite être acheminé à son point de vente.



(a) Poste d'assemblage des suspensions du train avant sur la base roulante



(b) Mise en place de pièces d'aspects dans l'habitacle

FIGURE 1.9 – Exemples de postes de la ligne d'Assemblage

Entre la ligne d'*emboutissage* et la sortie du véhicule de la ligne, il s'écoule en moyenne 15 heures. Le respect des temps de cycles est primordial car tout retard se répercute sur le flux de la ligne de production complète, avec les impacts de surcoûts qui en découlent.

La ligne de montage représente plus de la moitié de la masse salariale des opérateurs en production (Fig. 1.5). Les gammes de postes sont très variées et vont du simple clippage de pièces plastiques à du montage dans des zones difficiles d'accès de faisceaux électriques insérés dans des gaines. Avec des durées moyennes d'une minute, les postes sont presque exclusivement au défilé. Les tâches d'assemblage doivent être maîtrisées et nécessitent des formations spécifiques, car un retard peu entraîner un effet boule de neige et impacter toute la ligne de production.

1.3.2 Le choix des exosquelettes

Les guides ergonomiques internes au Groupe PSA permettent de dimensionner la charge des opérateurs sur chaque poste et ainsi de limiter les sources de TMS. Mais parfois, malgré les préconisations, des opérateurs signalent l'apparition d'inconfort ou de douleurs. Il devient alors important de trouver une solution d'assistance rapide.

Différentes approches existent pour diminuer la charge physique des opérateurs. Dans un premier temps, l'automatisation de la tâche est envisagée. Les étapes sont parfois trop complexes, demandent une grande dextérité et une grande flexibilité. La robotique usuelle reste contraignante, les espaces de travail doivent être fermés et sécurisés. Mais aujourd'hui, une nouvelle catégorie de la robotique permet d'ouvrir l'espace de travail du robot aux opérateurs pour leur permettre de travailler ensemble sur une même tâche (Fig. 1.10). On parle alors de robotique collaborative. Le bras robotisé est conscient de son environnement et des personnes qui entrent dans son espace de travail ou en contact avec lui. La contrepartie est que les vitesses de déplacement du robot et ses capacités en efforts sont limitées, ce qui souvent ne permet pas de respecter les contraintes de temps de cycle.

Si l'automatisation n'est pas envisageable, une étude du produit plus approfondie est conduite pour en faciliter la manipulation et le montage. Il est parfois possible de modifier les étapes du processus pour soulager le poste, en intégrant des phases de repos ou en découpant la tâche en plusieurs sous-tâches moins physiques. Lorsque les limites du produit sont atteintes et que la charge soumise à l'opérateur est toujours trop élevée, des solutions d'assistance à l'effort sont alors mises en place. De plus en plus de

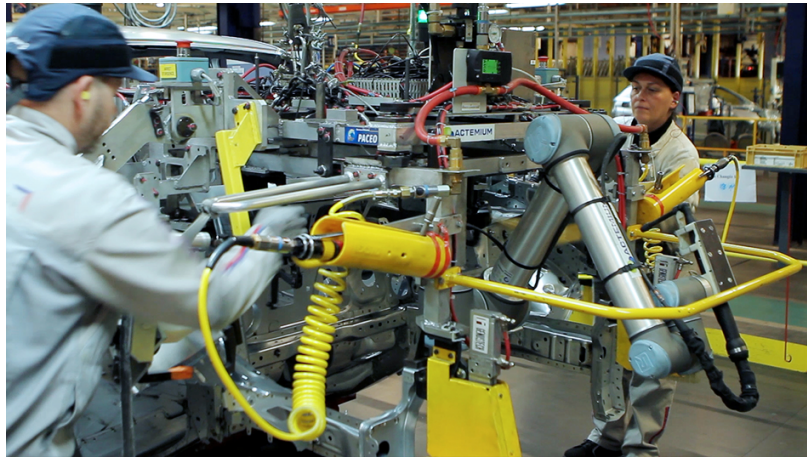


FIGURE 1.10 – Utilisation d'un bras Universal Robot sur un poste d'assemblage du groupe PSA, usine de Sochaux. Le robot réalise plusieurs vissages sur les ailes, aux côtés de deux opérateurs qui partagent l'espace de travail.



FIGURE 1.11 – Exemple de Skillet à hauteur variable, largement employé au sein du groupe PSA.

postes sont équipés de modules reconfigurables permettant d'ajuster l'environnement aux dimensions de l'opérateur. Des tables ou planchers réhaussables assurent une bonne position de travail sur les postes ne nécessitant pas une grande mobilité. Lorsqu'il s'agit de travailler autour de la voiture, les caisses sont positionnées sur des supports élévateurs qui s'adaptent à chaque poste selon les tâches à réaliser mais aussi selon les opérateurs (Fig. 1.11). Pour la manutention de pièces trop lourdes pour être portées, des manipulateurs à compensation de poids sont parfois mis en place. Ils annulent pour la plupart uniquement l'effet de la gravité en générant un effort vertical correspondant au poids propre du système plus celui de la pièce. Cependant, ils ne compensent pas l'inertie. De tels systèmes sont peu flexibles, notamment à cause des organes de préhension qui sont spécifiques à chaque pièce. De plus, leur implantation fixe est de moins en moins compatible avec les futures lignes de production reconfigurables et modulaires.

Dans certains cas très spécifiques, nécessitant une grande mobilité et dextérité, aucune de ces solutions conventionnelles ne peut être employée. Les exosquelettes représentent une solution invasive, en agissant directement sur l'opérateur et non son environnement. C'est pourquoi ils sont considérés uniquement comme derniers recours aujourd'hui [31]. Ils ont cependant de nombreux atouts. Le

premier est leur flexibilité. Ils ne nécessitent pas d'installation fixe au poste en utilisation. Des équipements spécifiques au stockage, à l'entretien et au rechargement peuvent cependant être nécessaires en dehors de la ligne. L'assistance physique fournie permet d'améliorer la versatilité des opérateurs en homogénéisant leurs capacités physiques. Fournir des moyens d'assistance adaptables est également un axe de l'Usine du Futur, en proposant des solutions personnalisées à chaque employé. Le ciblage des maladies professionnelles potentielles permet d'anticiper leur apparition, et d'en réduire les coûts associés. L'objectif est de soulager l'opérateur de manière durable, avec encore aujourd'hui un succès mitigé comme le montre Theurel et al. [32].

De tels systèmes offrent des solutions d'assistance qui jusque là n'existaient pas. La mise en évidence des besoins doit donc s'adapter, pour permettre de mettre en liens les attentes avec les exosquelettes disponibles.

1.3.3 Catégorisation des besoins

Quels que soient les environnements envisagés, certaines problématiques communes apparaissent entre les postes nécessitant une assistance physique. Pour faciliter l'identification des postes cibles, nous proposons une catégorisation des Cas d'Usage (CU). Cette classification est composée de trois groupes [P1]. Chacun est basé sur une problématique récurrente, identifiée par les ergonomes sur des postes révélant une potentielle source d'apparition de maladie professionnelle. La Figure 1.12 représente l'algorithme utilisé pour classer les tâches dans chaque catégorie. Des exemples issus de l'industrie automobile sont utilisés pour illustrer et contextualiser chaque problématique.

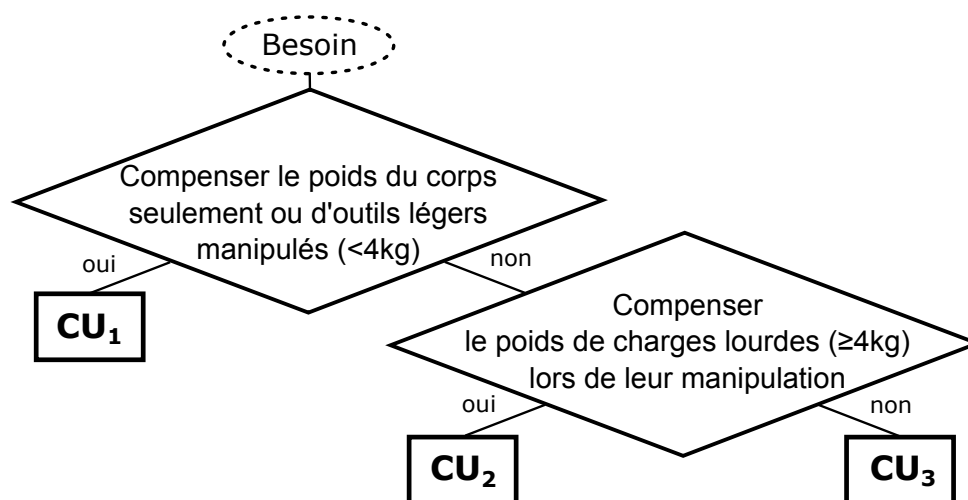


FIGURE 1.12 – Algorithme de classification des besoins

1.3.3.1 CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement

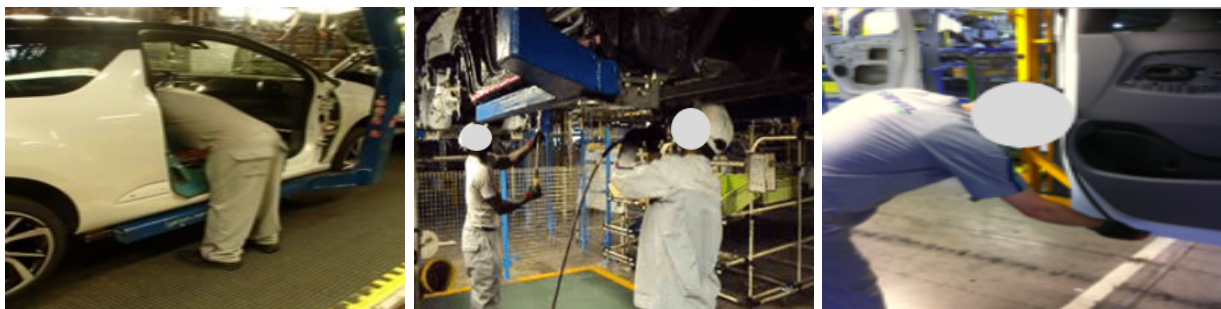
Le maintien postural est assuré par les muscles dits posturaux. Ils sont intégrés à l'ensemble de la musculature et assurent la tonicité du corps, permettant de tenir debout par exemple. Même au repos total, ces muscles restent légèrement contractés. Ils sont destinés à une action musculaire de faible intensité, mais sur une longue période. Ils sont aussi appelés muscles profonds, ou statiques. Indépendant de notre volonté, ils se distinguent des muscles dits dynamiques qui eux permettent d'interagir avec

l'environnement. Ils sont beaucoup plus puissants, mais se fatiguent également plus vite. Même si tous les types de muscles sont sollicités en général, ils restent spécialisés dans leur application. C'est généralement là que se situe la source des douleurs musculaires lors du maintien d'une posture contraignante. La contraction prolongée des muscles dynamiques empêche les muscles statiques de remplir leur rôle. La dépense énergétique augmente fortement, et modifie l'équilibre musculaire.

Une première typologie de postes concerne la posture de buste penché en avant, avec éventuellement les bras tendus pour réaliser des manipulations. La charge dorsale est importante, les épaules également restent sous tension. Un exemple concerne le poste de mise en place du frein à main. L'opérateur travaille les bras tendus et le buste penché en avant pour atteindre le milieu de caisse et applique des efforts pour fixer le frein à main (Fig. 1.13a).

Une deuxième typologie de poste concerne la posture bras en l'air. Certaines tâches en hauteur, comme le travail sous caisse, nécessitent le maintien des bras levés au-dessus de la tête. Ce type de contrainte est critique car, en plus de la tension musculaire permanente du dos et des épaules, le coût cardiaque est aggravé par la position des bras au-dessus du cœur qui nécessite une pression artérielle supérieure (Fig. 1.13b).

La dernière typologie de poste concerne les jambes fléchies. La hauteur de travail n'étant pas constante, l'opérateur est amené à plier les jambes pour s'ajuster. Pour les postes fixes, une simple chaise assis-debout est utilisée. Mais ceci n'est pas toujours possible à cause du besoin de mobilité ou du travail au défilé (Fig. 1.13c).



(a) Mise en place du frein à main dans l'habitacle au défilé (b) Vissage sous caisse au défilé (c) Mise en place du joint de porte au défilé

FIGURE 1.13 – Exemples de postes nécessitant un maintien/mouvement contraignant

1.3.3.2 CU_2 : Port/manutention de charges lourdes

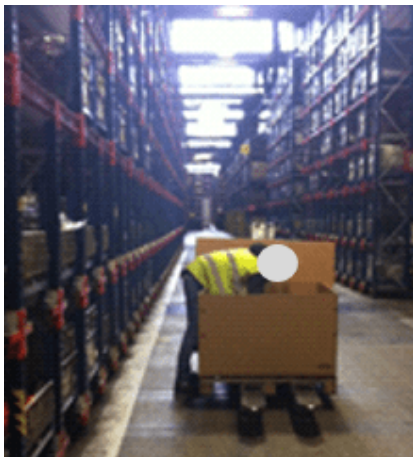
Le port et la manutention de charges lourdes concernent tous les métiers (emboutissage, ferrage, montage, mécanique, logistique...). Cette action est composée de quatre étapes :

- prise de pièce ;
- transport de la pièce ;
- dépose de la pièce ;
- retour à plein / vide ou déplacement vers une autre prise de pièce.

De manière générale, il faut privilégier les postures debout, avec des déplacements de l'ordre de quelques mètres. Si les normes ergonomiques permettent d'éviter les situations trop sollicitantes, certaines opérations restent physiques et potentiellement sources de maladies professionnelles. La majeure partie des tâches nécessitant le port ou la manipulation de charges très lourdes a été automatisée ou

assistée avec des bras manipulateurs. Cependant avec les modifications futures sur les lignes, et l'automatisation de certaines tâches qui aujourd'hui permettent à l'opérateur de se reposer, des postes vont devenir plus éprouvants.

En logistique par exemple, l'opérateur en charge du réapprovisionnement du secteur *kitting* transporte par véhicule les caisses contenant les différentes pièces nécessaires à la ligne d'assemblage. Après avoir chargé les palettes provenant des fournisseurs sur les remorques, il les achemine jusqu'à l'espace de *kitting* où il les décharge manuellement. Il manipule des caisses de poids et de tailles différentes, à des hauteurs multiples. Aujourd'hui il n'est pas possible de robotiser la phase de déchargement, mais il est prévu d'automatiser les déplacements des palettes de caisses avec des AGV (Automated Guided Vehicles). Cela supprime le temps de repos physique de l'opérateur durant la conduite du véhicule. La tâche allouée à l'opérateur concernera uniquement le déchargement et rangement des caisses de pièces. Le poste deviendra très contraignant physiquement (Fig. 1.14a). Un autre exemple concerne la manipulation des faisceaux électriques. Ceux-ci approchant les 10kg pour certains, leur poids couplé à leur souplesse en font des pièces compliquées à porter et manipuler (Fig. 1.14b).



(a) Déchargement des palettes



(b) Transport et mise en place du faisceau principal

FIGURE 1.14 – Exemples de postes avec du port et de la manipulation de charges lourdes

1.3.3.3 CU_3 : Application d'efforts d'assemblage

Même si l'application d'effort concerne quasiment tous les postes, cette caractéristique ne s'applique qu'aux postes nécessitant un effort spécifique important, de l'ordre de plusieurs dizaines de Newtons. Les directions, les surfaces de contact, le poids des pièces en mouvement ou l'effort appliqué peuvent varier.

Les postes concernés sont évidemment très nombreux, mais la plupart se retrouvent sur les lignes d'assemblage. Ils concernent du clippage d'agrafes plastiques ou métalliques, de connecteurs, de durites, de faisceaux électriques ou d'ouvrants de la voiture. Trois exemples sont représentés Figure 2.19. Les membres supérieurs sont les plus sollicités, et les groupes musculaires impactés variés. Les efforts importants sont le plus souvent ponctuels, et pour limiter la fatigue musculaire, les postes sont équilibrés pour solliciter d'autres groupes musculaires avec une intensité plus faible.

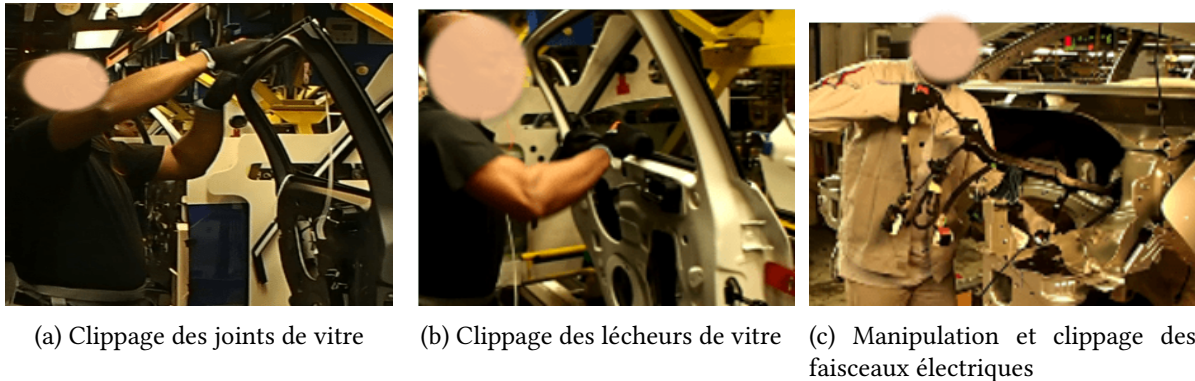


FIGURE 1.15 – Exemples de postes nécessitant l'application d'un effort d'assemblage

1.3.4 D'autres secteurs concernés par ces besoins

Les tâches manuelles identifiées dans le secteur automobile ne sont pas isolées et les problématiques peuvent être étendues à d'autres secteurs.

- Secteur du génie civil : ce secteur est propice aux sollicitations importantes des opérateurs. Les tâches d'acheminement des matériaux de construction et manipulation de charges dans des postures éprouvantes sont encore souvent réalisées par les ouvriers, qui peuvent se déplacer plus facilement dans les espaces encombrés et exigus.
- Secteur naval : les chantiers navals sont en recherche constante d'innovations pour soulager le travail des opérateurs. La moyenne d'âge ne cesse d'augmenter, et le temps de formation requis est très long. Un soudeur par exemple, métier clé dans le secteur naval, est considéré qualifié après environ 7 ans d'expérience. Les soudeurs sont donc très sollicités, et doivent assurer une qualité constante quelle que soit la soudure. A l'intérieur de la coque, dans des caissons très exigus, ils se retrouvent souvent dans des postures inconfortables et très contraignantes. Sur l'enveloppe extérieure de la coque, les cordons sont très longs et le maintien de la posture est éprouvant. C'est pourquoi il est important de les protéger au mieux.
- Secteur aéronautique : dans ce secteur, les cadences sont très faibles comparé à l'automobile. Mais les opérations réalisées sont souvent très longues et répétitives, et varient d'une journée à l'autre. De plus, les espaces confinés requièrent des postures très inconfortables.
- Secteur agricole : ce secteur est reconnu comme très éprouvant, avec des tâches très variées réalisées à longueur de journée. On retrouve la répétition de certains gestes, aggravée par des postures parfois contraignantes. Le port de charges lourdes est omniprésent, tout comme les affections chroniques liées aux vibrations des engins.

Dans le cadre de nos travaux, nous nous intéressons uniquement au secteur automobile. Les problématiques sont généralisables à de nombreux autres secteurs d'activités, mais les conditions d'utilisation sont trop variées pour être intégrées à cette étude.



FIGURE 1.16 – Illustrations de besoins dans des secteurs autres que l'automobile

1.4 Conclusions du contexte

Malgré les améliorations constantes en terme d'ergonomie, le marché très compétitif de l'automobile pousse l'optimisation des moyens de production à leur limite et certains métiers de la production industrielle restent physiques. Les solutions usuelles telles que les robots à bras manipulateurs ne sont parfois pas suffisantes et ne respectent pas les contraintes de reconfigurabilité et modularité des nouveaux moyens de production. Les exosquelettes offrent une alternative lorsqu'aucune autre solution n'est adaptée. Une nouvelle catégorisation des besoins, issue des postes identifiés comme éprouvants, permet de mettre en évidence les tâches nécessitant assistance. Le maintien postural/assistance au mouvement, le port/manutention de charges lourdes et les efforts d'assemblage représentent trois problématiques distinctes identifiées dans les moyens de production actuels, qui permettront ensuite d'associer les exosquelettes répondant à ces besoins.

Positionnement de la thèse

Sommaire

2.1	Évolution et applications des exosquelettes	21
2.2	Présentation des exosquelettes industriels	24
2.2.1	Génération de couple au niveau de la hanche	24
2.2.2	Génération de couple au niveau du genou	25
2.2.3	Génération d'effort au niveau de l'épaule	26
2.2.4	Mécanismes à compensation de charges	27
2.2.5	Génération d'un effort appliqué à l'environnement	29
2.2.6	Reprise d'effort par appuie rigide	29
2.2.7	Multi-assistances	30
2.3	Les technologies associées aux exosquelettes industriels	31
2.3.0.1	Les exosquelettes rigides	32
2.3.0.2	Les exosquelettes souples	34
2.4	Proposition de classification	35
2.5	Choix d'un cas d'étude	41
2.5.1	La problématique d'application d'efforts	41
2.5.2	Description du poste sélectionné	41
2.6	Déploiement de la technologie exosquelette	43
2.6.1	Évaluation et outils de mesure	43
2.6.1.1	Outils de mesure objectifs	43
2.6.1.2	Simulation	46
2.6.1.3	Outils de mesure subjectifs	47
2.6.2	Protocoles de mesure	47
2.7	Objectifs de thèse	49
2.8	Conclusions du positionnement	50

Nos travaux s'inscrivent dans la recherche et le développement de solutions d'assistances physiques portatives. Ce marché, transversal à d'autres secteurs, propose déjà de nombreuses solutions. Mais si l'intérêt des exosquelettes est établi, les produits disponibles ne répondent pas toujours aux attentes. La pression concurrentielle et les contraintes de productivité laissent une faible marge de manoeuvre aux développeurs de solutions d'assistance.

Dans un premier temps, nous détaillons un état de l'art depuis l'origine de ce type d'assistance jusqu'aux technologies actuelles. A l'issue de cet état de l'art, nous proposons une classification des systèmes actuels avec 75 exosquelettes identifiés comme pouvant potentiellement être utilisés dans un contexte industriel. Cette classification différencie les dispositifs disponibles sur le marché ou encore en développement, les propriétés fonctionnelles, et se réfère également aux cas d'application décrits dans le chapitre précédent. Nous en déduisons un poste représentatif du Groupe PSA potentiellement source de maladie professionnelle et n'ayant aujourd'hui aucune solution d'assistance répondant aux attentes. Ce besoin servira par la suite de cas d'étude référence pour le développement d'un nouveau dispositif. Enfin, nous détaillons les outils et méthodes actuelles permettant de valider l'utilisation de tels dispositifs dans un contexte industriel

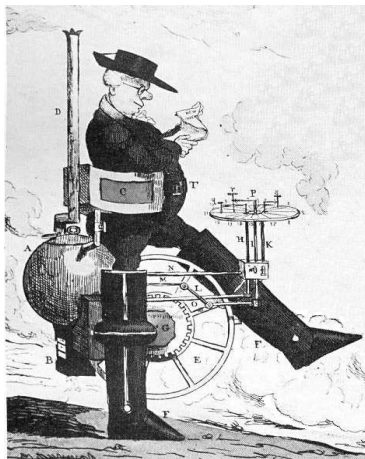
2.1 Évolution et applications des exosquelettes

Le terme "exosquelette" initialement utilisé en biologie fait référence au squelette externe d'un animal ou d'un végétal qui protège et supporte les organes internes [33]. Ici, les exosquelettes font référence à des systèmes d'assistance portés et contrôlés par l'homme pour compenser son poids, une charge, amplifier un effort, en intégrant uniquement des contrôles bas-niveau [34]. Les contrôles haut-niveau intègrent "Human-in-the-Loop" (HIL) pour la prise de décision.

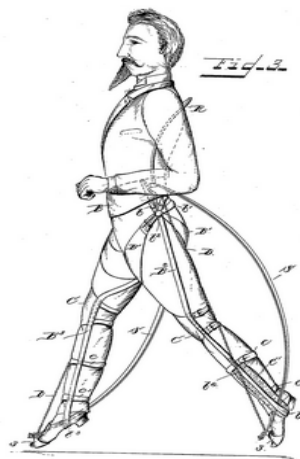
Depuis 1830, l'idée d'un mécanisme portable d'assistance germe dans l'esprit des inventeurs. Le concept d'un pantalon mécanique d'aide à la marche imaginé par R. Seymour présenté Fig. 2.1a est actionné par vapeur, et a depuis inspiré de nombreux inventeurs. Vers 1890, Nicolas Yagn conceptualisa un système de deux lames ressorts géantes permettant aux soldats russes de courir plus vite et sauter plus haut (Fig. 2.1b). Mais à cause des limitations techniques de l'époque, la quasi totalité de ces inventions sont restées à l'état de concept. Les premières apparitions d'exosquelettes modernes remontent à quelques dizaines d'années, avec notamment *Hardiman I* développé dans les années 60 par l'ingénieur Ralph Mosher (Fig. 2.1c). Conçu pour des besoins militaires de port de charge (munitions aéronautiques), il était basé sur le principe de commande maître/esclave et ne faisait que suivre les mouvements de l'opérateur. Les difficultés de détection des mouvements humains, la complexité mécanique, le temps de traitement des signaux trop important et la masse considérable de 700kg de la structure a stoppé d'éventuelles évolutions [35]. Le bras a cependant été utilisé plus tard comme outils de téléopérations plus tard.

En parallèle, des orthèses actives destinées à la rééducation médicale sont développées. Mais c'est dans les années 2000 que fleurissent les projets d'exosquelettes, grâce notamment au programme de recherche "Exoskeleton for Human Performance Augmentation" financé par DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency, USA). Les exosquelettes actuels ont également des applications dans les domaines des jeux vidéos, ou encore la téléopération. Mais c'est dans les assistances physiques que leur application est la plus répandue. Ce marché est aujourd'hui fragmenté en trois milieux distincts.

Le secteur médical



(a) Jambes à vapeur, R. Seymour 1830



(b) Jambes à ressorts, N. Yagn, 1890



(c) *Hardiman I* combinaison mécanique, R. Mosher 1960 [36]

FIGURE 2.1 – Évolution des premiers concepts d'exosquelettes.

La rééducation médicale est un processus chronophage et complexe, pour les patients mais aussi pour les praticiens. Les séances, réalisées manuellement pour la plupart, sont souvent très longues et éprouvantes pour le personnel. Les exosquelettes montrent un réel apport, car ils permettent de libérer les praticiens lors de ces phases de manipulations répétitives [37]. De plus, ils offrent un meilleur guidage, avec un suivi précis de l'évolution physique des patients. Des systèmes comme *ARMin* [38, 39], permettant une manipulation haptique du membre supérieur, rendent plus accessible la réhabilitation intensive. Pour assurer un pilotage le plus précis possible, il est important que la structure soit rigide. Cela augmente le poids, et par conséquent la taille des actionneurs nécessaires. Au final, ces systèmes sont souvent très lourds, destinés à un usage statique et donc fixé au sol. Un exemple est le système *ALEX* (Fig. 2.2a), destiné à la réhabilitation physique des patients atteints de désordres neurologiques, musculo-squelettiques ou orthopédiques des membres supérieurs [40].

Certains exosquelettes proposent une assistance pour les mouvements quotidiens. Ils sont mobiles et peuvent être portés [41], offrant à des personnes diminuées physiquement de retrouver une certaine autonomie. La principale application, et la plus répandue, concerne l'assistance des membres inférieurs. Une société française, Wandercraft, a validé médicalement et commercialisé ses premiers exosquelettes *Atalante* en Avril 2019 (Fig. 2.2b). Il est destiné à des personnes paraplégiques, et leurs permet de remarcher en toute autonomie.

Le secteur militaire

Le domaine militaire voit dans les exosquelettes une opportunité pour améliorer les capacités physiques du soldat en mission, lui permettant d'être plus efficace plus longtemps [44]. De nombreux pays s'intéressent à cette technologie (État-Unis, Chine, Canada, France, Russie, etc.) et il est difficile d'estimer correctement le nombre d'initiatives de ce genre. Mais les informations disponibles au public montrent que les avancées technologiques de ces dix dernières années ont permis de mettre au point de nombreux types d'exosquelettes, et que ce marché est en forte croissance. Les contraintes sont très strictes, en aucun cas l'équipement ne doit perturber le comportement du soldat. Et c'est ici l'enjeu principal des évolutions technologiques dans ce milieu, car une vie peut être mise en jeu lors du fonctionnement. Un exemple est le modèle *Dermosquelette* (Fig. 2.3a) développé par SAFRAN Electronic and Defense en partenariat avec B-Temia, assistant le soldat lors de marches intensives et pour une



(a) *ALEX*, de Kinetek Wearable Robotics. Rééducation membres supérieurs [42]



(b) *Atalante*, de Wandecraft. Marche pour paraplégiques [43]

FIGURE 2.2 – Exosquelettes d'assistance médical.

longue période. Les jambes mécatroniques sont équipées de moteurs au niveau de la liaison du genou, et assistent la flexion des jambes en marche ou en statique. Le *Uprise* (Fig. 2.3b), conçu par la société québécoise Mawashi, a également pour objectif de soulager le soldat de la charge qu'il transporte. Le système composé d'une colonne vertébrale et de jambes mécaniques supporte la charge et reprend les efforts à la place du soldat.



(a) *Dermosquelette*, assistance à la marche et à la flexion des jambes, Safran [45]



(b) *Uprise*, assistance au port de charges lourdes, Mawashi [46]

FIGURE 2.3 – Exemples d'exosquelettes d'assistance destiné au soldat.

Les domaines médicaux et militaires ont montré un intérêt croissant pour le concept d'exosquelette, avec un nombre toujours plus important de solutions proposées. Mais ce ne sont pas les seuls secteurs pouvant bénéficier d'une assistance physique [47]. Les exosquelettes sont aujourd'hui une solution envisagée dans un contexte industriel. L'objectif n'est pas d'augmenter la capacité de travail des opérateurs, mais seulement de soulager le stress physique provoqué par des tâches qu'ils réalisent aujourd'hui. Des études ergonomiques de chaque poste sont menées régulièrement pour en étudier les

contraintes biomécaniques et définir si des facteurs à risque de développement de maladies professionnelles telles que les TMS sont observés. Les assistances de type exosquelette offrent un axe important de recherche dans le cadre de l'usine du futur. Mais c'est aussi un secteur très contraignant : les cadences élevées, les contraintes d'environnement et le besoin de flexibilité sont les freins majeurs.

2.2 Présentation des exosquelettes industriels

Les exosquelettes représentent une option d'assistance à la fois flexible et alternative quand il n'y a pas d'autre solution adaptée, avec le double objectif d'améliorer les conditions de travail sans dégrader les performances de productivité. Le nombre de dispositifs disponibles sur le marché ou en développement est en plein essor, avec une demande croissante de la part du secteur automobile notamment [48]. Mais si les contraintes d'utilisation varient, les problématiques d'assistance, elles, sont souvent similaires. Pour représenter l'état actuel de cette technologie, nous proposons de représenter l'existant en regroupant les exosquelettes selon leur fonctionnement.

2.2.1 Génération de couple au niveau de la hanche

Que ce soit pour supporter le buste en position fixe, ou pour assister le mouvement en reprenant une partie des efforts, ces exosquelettes mimétisent le réflexe humain naturel : pousser le buste en s'appuyant sur les cuisses. La résultante recherchée est donc un effort normal au niveau du torse, orienté dans le sens de l'extension de la hanche. Le but principal est de réduire la charge des muscles de maintien postural du buste, comme les lombaires. Ils sont utilisés pour du maintien de position contraignante, ou pour assister le port de charges lourdes.

La première déclinaison concerne les systèmes possédant un appui direct sur le buste. Ici l'effort d'extension entre les cuisses et le buste est réalisé au niveau de la hanche, que ce soit par un système mécanique ou une motorisation électrique. Pour l'appui sur les cuisses, il s'agit de palettes incurvées parfois agrémentées de mousse pour le confort. Ces deux pièces sont reliées (indépendamment ou non) à une liaison pivot au niveau de la hanche, où un couple d'assistance est généré. L'effort est ensuite transmis au buste par un plastron. La différence vient principalement du moyen utilisé pour générer l'effort.

Les modèles présentés Figure 2.4 appliquent l'effort résultant au niveau du buste par un appui direct sur la poitrine, utilisant uniquement de l'énergie mécanique. L'encombrement de la partie ventrale doit être pris en compte car il se situe dans l'espace de travail des membres supérieurs. Le modèle produit par *Laevo* (Fig. 2.4a) utilise un système de came, qui vient compresser un ressort lors de la flexion du buste. Changer la raideur du ressort permet d'adapter le couple compensateur pour une inclinaison donnée, tandis que modifier la courbure de la came fait varier l'évolution du couple au cours de la flexion. Pour le système *BackX S* (Fig. 2.4b), le couple compensateur est généré au niveau de la hanche par un ressort à gaz. Lors de la flexion du buste, le vérin se comprime et développe le couple d'assistance. Pour le réglage, il est possible de modifier le déport de la fixation du vérin et donc du bras de levier qui vient comprimer le vérin.

Les exosquelettes présentés Figure 2.5 génèrent également l'effort d'assistance de manière mécanique. Mais à la différence de ceux présentés Figure 2.4, l'effort est transmis au buste depuis le dos au travers d'un harnais et non en appui direct. L'espace de travail ventral s'en retrouve dégagé au détriment d'un encombrement dorsale plus important.

(a) *Laevo V2*, Laevo [49](b) *BackX S, SuitX* [50]

FIGURE 2.4 – Exosquelettes d’assistance au maintien et mouvement du buste, transmission ventrale

La technologie du *BackX AC* présenté Figure 2.5a est la même que celle du *BackX S*, il s’agit d’un ressort à gaz travaillant en compression. Pour le modèle de *Lowe’s* (Fig. 2.5b) et le *Spexor* (Fig. 2.5c), l’effort d’assistance entre le buste et les cuisses est produit par la déformation élastique de profilés souples positionnés dans le dos [51]. Ils fléchissent en même temps que le porteur se penche et produisent ainsi un effort pour retrouver leur courbure originale. Pour ne pas gêner le mouvement, un glissement le long des profilés est nécessaire. Cela nécessite des parties mobiles supplémentaires, pouvant être encombrantes. *Exo-Muscle* (Fig. 2.5d) est atypique car l’actionnement de l’extension de la hanche est assurée par un système de muscle pneumatiques [52]. Positionnés dans le dos, leur extension lors de l’inclinaison du buste génère l’effort d’assistance.

Les exosquelettes Figure 2.6, tout comme ceux présentés Figure 2.5, génèrent un effort depuis la partie dorsale. Mais leur particularité repose dans leur actionnement. Concernant les modèles *Active Trunk* du projet *Robo-Mate* [56] (Fig. 2.6a), *Atoun Model Y* (Fig. 2.6b) et *Lumbar* (Fig. 2.6c), l’effort au niveau de la hanche est généré par un moteur électrique. Plus puissant que les modèles mécaniques mais aussi plus lourds, ils sont destinés principalement à du port de charge. La seule différence notable concerne le *Lumbar*, qui renvoie l’effort des cuisses uniquement au niveau de la taille. Cela permet de diminuer fortement l’encombrement, mais les zones d’appui sur le ventre ne permettent pas de transmettre autant de force que les autres.

Pour les deux exosquelettes présentés Figure 2.7, des bretelles élastiques viennent relier le haut des mollets aux épaules. Lorsque le porteur du système penche le buste ou plie les jambes pour saisir un objet au sol, l’élastique se tend et vient supporter une partie des efforts au niveau des lombaires notamment.

2.2.2 Génération de couple au niveau du genou

Il existe une catégorie d’exosquelettes qui permet d’assister la flexion des jambes. Des exemples sont illustrés Figure 2.8. En prenant appui sur le mollet et la cuisse, une liaison génère un couple au niveau du genou.

Les jambes sont motorisées au niveau du genou par un moto-réducteur. Le couple généré est appliqué sur les cuisses et les jambes, dans les deux directions. Ces modèles permettent donc d’assister l’extension et la flexion des jambes. Dans le premier cas, il s’agit de compenser le poids et l’inertie de la jambe lors de la marche, puis la détente. Dans l’autre cas, il s’agit de soulager l’effort de flexion en

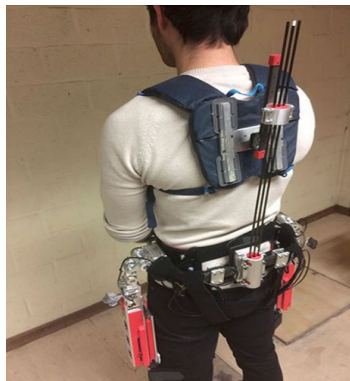
(a) *BackX AC, SuitX* [50](b) *Lift-assistance*, Lowe's Innovation Lab et Virginia Teck [53](c) *Spexor*, projet européen [54](d) *Exo-Muscle*, Innophys [55]

FIGURE 2.5 – Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, transmission dorsale

(a) *Active Trunk*, Robo-Mate [57](b) *Model Y*, Atoun [58](c) *Lumbar*, Cyberdyne [59]

FIGURE 2.6 – Exosquelettes d'assistance au maintien et mouvement du buste, actionnement dorsal actif.

freinant le mouvement.

2.2.3 Génération d'effort au niveau de l'épaule

Le maintien des bras au dessus des épaules pour du soutien ou de l'assistance au port de petites charges est récurrent dans le domaine de l'industrie automobile. De nombreux modèles du marché offrent une solution, et ils sont tous basés sur le même concept. Une structure dorsale repose sur les



(a) Corfor, Corfor[60]



(b) Flexlift, Kinetic Edge [61]

FIGURE 2.7 – Exosquelettes d’assistance au maintien et mouvement du buste, actionnement dorsal souple.



FIGURE 2.8 – Exosquelette d’assistance à la flexion des jambes : Keeogoo, B-Temia [3]

hanches et les épaules, généralement rigide. Sur la partie haute, deux bras sont reliés et viennent supporter les bras de l’opérateur. Ils possèdent plusieurs degrés de liberté (différents selon les modèles) pour suivre les mouvements, mais un seul de ces degrés est équipé d’une assistance.

Le *Airframe* (Fig. 2.9a) est équipé d’un ressort de traction logé dans la tubulure du bras. La vis de précontrainte permet d’en régler la puissance. Le modèle *Skelex* (Fig. 2.9b) lui utilise de la déformation de lamelles souples situées dans le dos pour générer l’effort. Pour le *Paexo Shoulder* (Fig. 2.9c), ce sont les ressorts situés dans le dos qui fonctionnent en traction pour générer l’effort.

2.2.4 Mécanismes à compensation de charges

Les exosquelettes de cette catégorie sont uniquement destinés à du port de charge. La technologie, d’abord inspirée des systèmes Steadycam utilisés dans le cinéma par les cameramans, est composée d’un ou plusieurs bras fixés à une structure dorsale rigide. Ce sont des bras purement mécanique, dont le principe de fonctionnement repose sur la compensation de gravité.

On retrouve cette technologie sur de très nombreux modèles de port de charges, car elle permet de compenser des charges élevées en redistribuant la charge dans les jambes et les hanches. Elle comporte



FIGURE 2.9 – Exosquelettes d’assistance à l’élévation et maintien des bras en l’air.

cependant de nombreux défauts. Le poids élevé du système, la transmission des efforts dans le reste du corps, ainsi que l’encombrement important sont à prendre en considération.



FIGURE 2.10 – Exosquelettes d’assistance au port de charge par compensation de poids

Les exosquelettes *Armor-Man* (Fig. 2.10a), *Wielder* (Fig. 2.10b) et *Picker* (Fig. 2.10c) sont tous basés sur la même conception : une structure dorsale à laquelle sont reliés un ou deux bras d’assistance. Ces

bras, précontraint mécaniquement, permettent de compenser un certain poids selon le réglage utilisé. Un exemple de cette technologie est le bras *ZéroG*, largement utilisé. Des vérins ou des élastiques exercent des efforts dans le mécanisme, résultant en une force verticale qui compense le poids de la charge manipulée. Pour certains, la charge est directement fixée sur les bras de l'exosquelette et le porteur ne fait que positionner les effecteurs. Mais parfois, l'assistance s'applique au niveau de l'avant bras et l'opérateur manipule la charge avec les mains.

Le *V22* (Fig. 2.10d) développé par Lockheed Martin est quant à lui un système mécanique à câbles. Des bagues au niveau des doigts permettent d'accrocher l'objet. Un ressort dans le dos applique un effort de traction sur le câble permettant de compenser une charge donnée. L'effort est reparti au niveau des épaules et du dos, permettant de diminuer le couple induit au niveau des lombaires et soulager les bras et épaules.

2.2.5 Génération d'un effort appliqué à l'environnement

Les exosquelettes détaillés ici permettent d'assister l'application d'un effort spécifique par l'opérateur sur son environnement. Les exemples illustrés Figure 2.11 génèrent un effort lors de la fermeture des doigts de la main.



(a) *Power Assist Glove*, Gloria Mundi Care [69]



(b) *IronHand*, Bioservo [70]

FIGURE 2.11 – Exosquelettes d'assistance à l'application d'effort sur l'environnement

Le *Power Assist Glove* (Fig. 2.11a) utilise l'énergie pneumatique. Des alvéoles en matière souple, situées sur l'extérieur des doigts, sont interconnectées. La mise sous pression, grâce à une capsule de CO_2 et un système d'électrovalves, entraîne la dilatation des chambres et force la structure globale à se plier.

Le *IronHand* (Fig. 2.11b) est quand à lui actionné par câbles, dont le fonctionnement est tout à fait similaire aux tendons de la main. Ici le fonctionnement se base sur le mimétisme humain. Des tendons artificiels implantés dans le gant et pilotés par des actionneurs linéaires permettent d'assister les doigts lors du serrage.

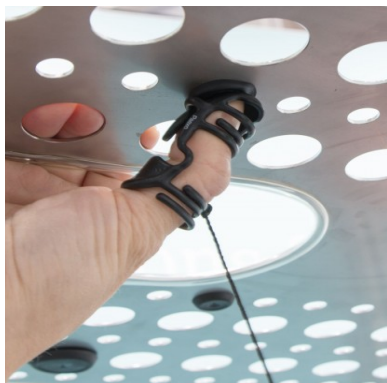
2.2.6 Reprise d'effort par appuie rigide

Des exosquelettes fonctionnent simplement comme un appuie. Les exosquelettes présentés Figure 2.12 soutiennent une articulation dans une certaine position prédéfinie, en agissant comme une butée arti-

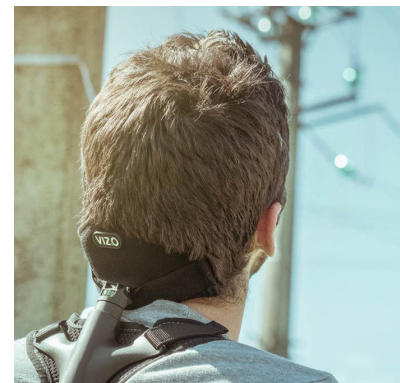
culaire.



(a) *Chairless Chair*, Noonee [71]



(b) *Paexo Thumb*, Ottobock Industrials [64]



(c) *Viz-O*, Viz-O [72]

FIGURE 2.12 – Support d’effort.

Le *Chairless Chair* présenté Figure 2.12a permet de bloquer la position des jambes fléchies, de manière confortable et sans générer d’effort sur une autre partie du corps. La liaison au niveau du genou possède une butée mécanique qui bloque la rotation lorsque l’angle voulu est atteint. L’opérateur se retrouve comme assis sur une chaise haute, les pieds renvoyant les efforts directement au sol.

Le support de pousse *Paexo Thumb* (Fig. 2.12b) permet de soulager la tension du doigt en agissant comme raidisseur. Sa conception légère permet de réduire la fatigue musculaire lors de tâche nécessitant l’appuie prolongé ou répété du doigt.

Le support de nuque *Viz-O* (Fig. 2.12c) permet lui de réduire la tension musculaire de la nuque. Lorsque le porteur penche la tête en arrière, le crâne s’appuie directement sur un support dorsal lié au buste.

2.2.7 Multi-assistances

Si la plupart des exosquelettes sont destinés à des assistances localisées, certains sont capables d’assister son porteur sur plusieurs parties du corps et pour différentes tâches comme illustrés à la Figure 2.13.

Leur diversité n’est pas nécessairement incompatible avec leur fonctionnement purement mécanique. Le *Shiva* (Fig. 2.13a), développé par la société ErgoSanté en collaboration avec la SNCF, propose plusieurs assistances en un seul équipement. Les technologies employées sont similaires à celles des assistances plus localisées. Ils sont composés de deux bras à compensation de charge, le support de nuque et le maintien du buste. Le *Fortis* (Fig. 2.13b) possède un bras à compensation de charge permettant d’accrocher un outil, mais aussi des jambes blocables qui redistribuent le poids directement au sol. Mais ce sont les systèmes motorisés qui offrent le plus de versatilité et de puissance. Constitué de jambes robotisées et d’une plateforme support, le *Hercule V3* (Fig. 2.13c), développé par la société française RB3D, propose une assistance complète au port de charge en distribuant les efforts directement au sol. Il en est de même pour le *Power-Loader* de Panasonic présenté Figure 2.13d qui, lui, transporte la charge dans le dos. Pour aller plus loin, l’exosquelette massif *Guardian XO* de SARCOS (Fig. 2.13e) permet d’assister le corps entier. La structure robotisée permet de suivre les mouvements des membres supérieurs et inférieurs, tout en reprenant les efforts de port ou d’application de force sur l’environnement.

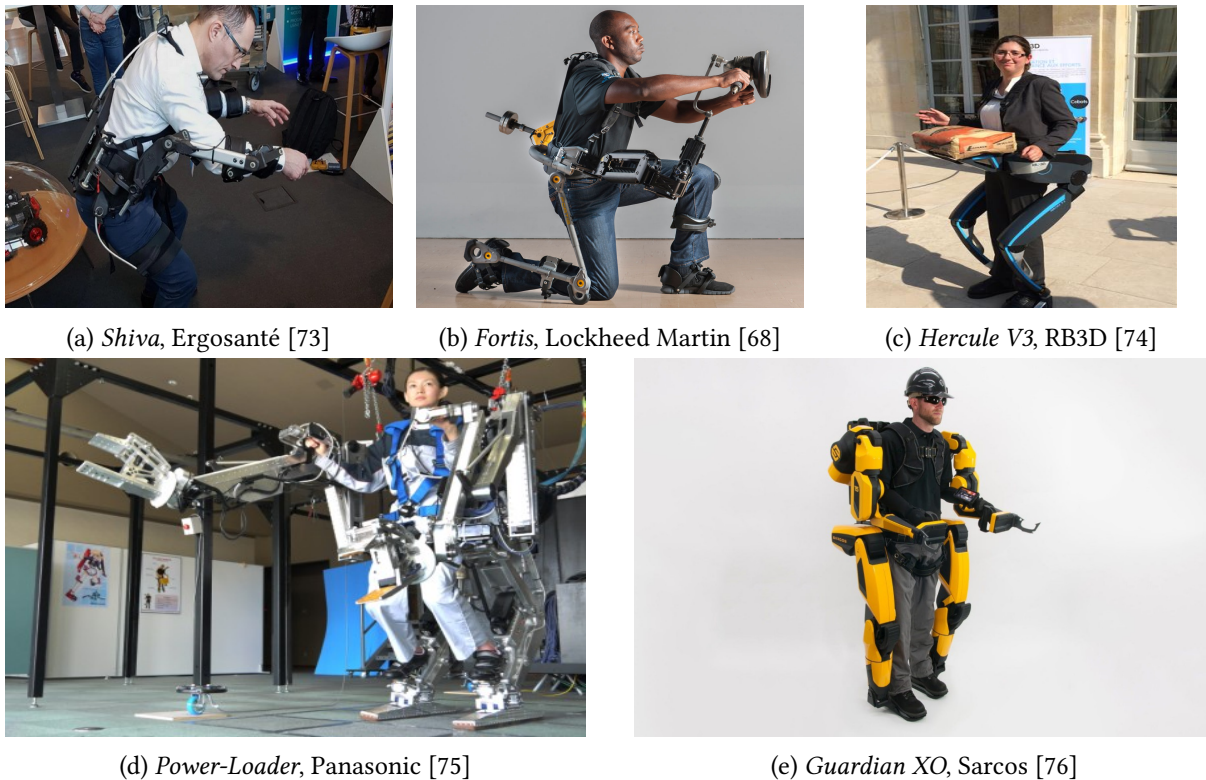


FIGURE 2.13 – Exosquelettes multi-assistances.

2.3 Les technologies associées aux exosquelettes industriels

Une catégorisation commune permet de distinguer trois types d'exosquelette au regard de leur principe de fonctionnement : passif, quasi-passif, et actif.

Les exosquelettes passifs génèrent une assistance uniquement basée sur des éléments mécaniques, comme des ressorts, élastiques ou lames souples. Leur fonctionnement repose sur le stockage et la dissipation de l'énergie mécanique provenant de l'opérateur, et donc ne nécessite aucune source d'énergie extérieure telle que les batteries. Le *Paexo* (Fig. 2.9c) ou le *Laevo* (Fig. 2.4a) par exemple, repose sur ce même principe de stockage d'énergie mécanique par un système de ressort. Il en résulte une simplicité de fabrication et une facilité d'usage. Mais leur adaptabilité réduite contre balance les avantages quand les conditions de travail sont variables.

Les exosquelettes quasi-passifs proposent une alternative pour améliorer la versatilité des exosquelettes passifs en intégrant des éléments passifs dont les propriétés mécaniques sont réglables en fonctionnement. Les systèmes à base de fluides électro-rhéologiques ou magnéto-rhéologiques par exemple permettent de faire varier la résistance d'une liaison à partir d'une source électrique extérieure [77].

Les systèmes actifs sont eux équipés d'actionneurs générant un effort à partir d'une source d'énergie extérieure. Leur conception est généralement plus complexe et coûteuse, pour un dispositif final souvent lourd. Une source d'énergie embarquée permet de garantir la mobilité de l'opérateur dans son environnement, au détriment de la masse embarquée plus élevée. Les solutions alimentées par cordon ombilical quand à elles réduisent grandement la liberté de mouvement. Cependant, les systèmes actifs offrent une bien meilleure versatilité. Les efforts générés peuvent être commandés et ajustés en temps réel, pouvant ainsi s'adapter aux variations de fréquence, amplitude, vitesse. La plupart utilisent

des moteurs électriques avec réducteur ou entraînement direct. Ils ont l'inconvénient d'être lourds, le couple généré est donc rapidement limité par la portabilité recherchée. Mais les technologies de batterie proposent une densité énergétique toujours plus intéressante, et restent une approche prometteuse. Dans le domaine du pneumatique, des actionneurs variés existent. Les vérins standards, ou encore les muscles pneumatiques [78, 79] permettent de générer un effort compliant très adapté à ce type d'équipement. Mais l'alimentation en air est contraignante, son stockage impose de très hautes pressions et les circuits de commande sont rapidement lourds et complexes si de nombreux actionneurs sont nécessaires [80]. Les actionneurs hydrauliques offrent une très bonne transmission d'efforts avec un rapport puissance / poids des actionneurs très élevé. On reconnaît ses propriétés dans l'utilisation d'organes de freinage capables de démultiplier les efforts de pression avec un très bon rendement. Mais ils nécessitent l'utilisation de réservoirs sous haute pression ou d'une pompe embarquée, souvent rédhibitoire pour des solutions portatives légères.

2.3.0.1 Les exosquelettes rigides

D'un côté se trouvent les exosquelettes rigides, utilisant des matériaux de faible densité tels que les plastiques, les composites en fibre de carbone ou certains métaux (aluminium, titane...). Leur rigidité permet une transmission d'efforts importante au détriment d'un poids généralement plus élevé. La cinématique et les interfaces entre la structure et son porteur représentent de forts enjeux technologiques pour assurer un bon suivi des mouvements et un contrôle des efforts échangés. Mais la complexité anatomique humaine conduit bien souvent à des structures volumineuses et lourdes.

Pour représenter et analyser les structures existantes, nous utilisons la schématisation issue de la robotique [81, 82]. Elle permet également de comparer les structures d'exosquelettes destinés à une même application.

Comme présenté dans [P1], nous étudions ici la structure de sept exemples d'exosquelettes, choisis pour représenter une large diversité. Pour chacun, la Fig. 2.14 en montre une image, son schéma cinématique ainsi que son graphe des liaisons. Cette approche peut être utilisée comme outil d'état de l'art pour les prochaines générations de dispositifs portables et comparer les différentes cinématiques au travers de nouveaux indicateurs.

La première colonne de la Fig. 2.14 montre une photo de l'exosquelette concerné. La seconde colonne présente la structure cinématique. Certains aspects technologiques ne peuvent être observés sans démonter l'exosquelette, et des approximations peuvent se retrouver dans la description de la structure. L'orientation de la base orthonormée est basée sur le corps du porteur. Z_0 est orienté vers l'avant du corps, X_0 vers la gauche et Y_0 est par définition orienté vers le haut. La structure de l'exosquelette est assimilée à un mécanisme F , composé de bras G_i connectés en parallèle pour assister certaines parties du corps. Chaque bras est une chaîne cinématique sérielle à laquelle est associée une lettre. Rg_i est l'espace vectoriel opérationnel du bras G_i . Un nombre spécifique est assigné à chaque corps, indexé par la lettre du bras associé (ex. 2_A). Le corps 1 est associé à la base, où les efforts sont distribués. Dans le cas d'assistances portables sans contact avec l'environnement, le corps 1 est un membre du porteur. Les sangles et supports souples qui ne font que maintenir l'exosquelette en place ne sont pas représentés ici. Les pièces passives S impliquées dans la génération de l'assistance, comme les ressorts, sont représentés par des pointillés rouges. Si ces pièces sont des actionneurs A , des flèches sont ajoutées aux pointillés rouges.

La troisième colonne de la Fig. 2.14 représente le graphique des liaisons. Lorsque la génération

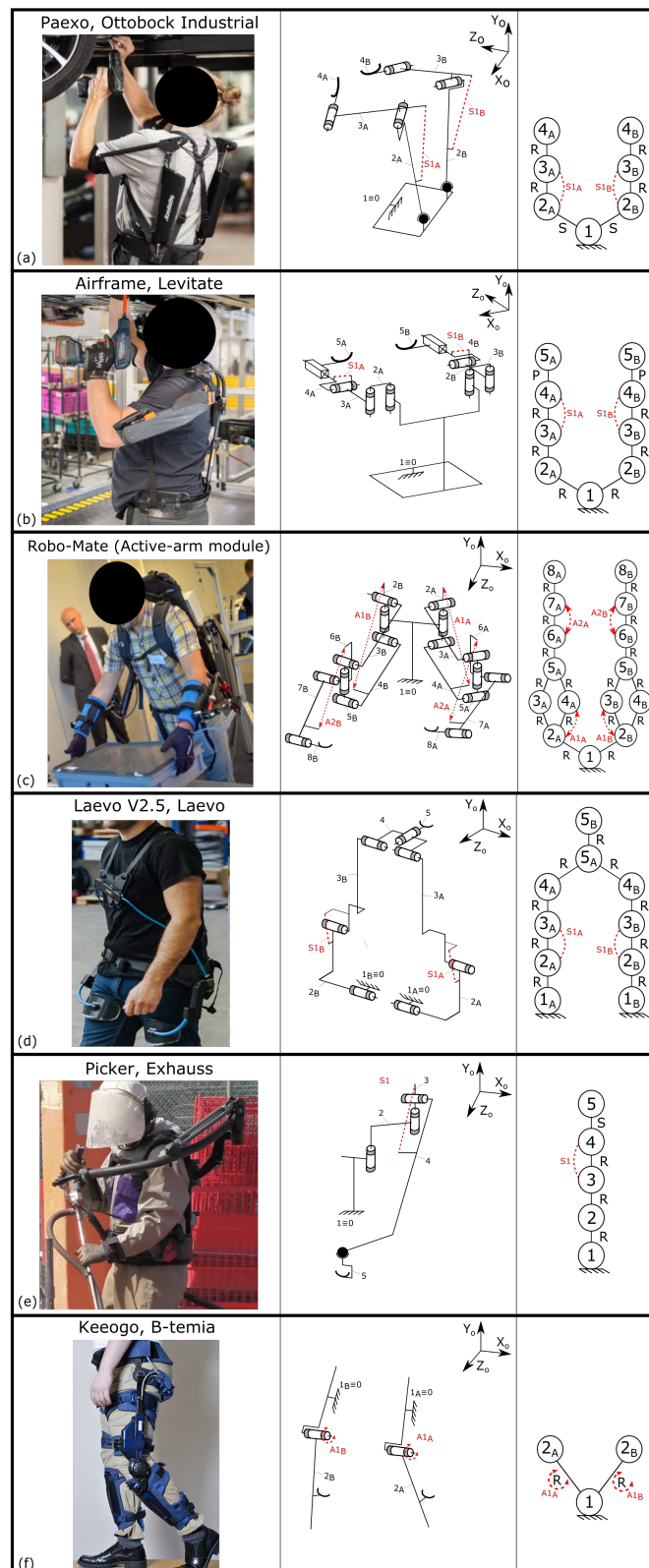


FIGURE 2.14 – Analyse structurale d'exosquelettes industriels [P1]. Colonne1 : Photos, Colonne 2 : Diagrammes cinématiques, Colonne 3 : Graphes des liaisons

d'effort est directement réalisé au niveau d'une liaison de l'exosquelette, c'est la lettre de la liaison qui est entourée par les pointillés spécifiant son type. Quand il s'agit de pièces supplémentaires à la structure, les pointillés relient les corps concernés.

Les exosquelettes Fig. 2.14a et 2.14b assistent le maintien et l'élévation des bras au dessus des épaules. Tous deux distribuent les efforts de réaction au niveau de la taille du porteur, dénommé 1. Pour le *Paexo* (Fig. 2.14a), l'effort d'assistance équivalent à un couple est généré par un système de ressort et bras de levier entre les corps 2_{A-B} et 3_{A-B} par l'intermédiaire des ressorts réglables $S1_A$ et $S1_B$. L'assistance est ensuite transmise aux bras par les interfaces 4_A et 4_B . Le *Airframe* possède une structure différente mais un fonctionnement proche. L'effort d'assistance est équivalent à un couple, généré par des ressorts $S1_A$ et $S1_B$ entre les corps 3_{A-B} et 4_{A-B} . L'assistance est ensuite transmise aux bras par les interfaces 5_A et 5_B .

L'exosquelette *Active Arms* renvoie également les efforts de réaction au niveau des hanches, mais supporte les avant-bras au travers des supports 8_A et 8_B . Deux bras constitués chacun de deux parallélogrammes en série sont actionnés par des câbles motorisés $A1_{A-B}$ et $A2_{A-B}$.

Le *Laevo* supporte le buste en transmettant les efforts aux cuisses. Pour cela, des palettes 2_A et 2_B sont positionnées sur les cuisses. Des systèmes de cames compressent des ressorts $S1_A$ et $S1_B$ entre les pièces 2_{A-B} et 3_{A-B} . Le couple d'assistance ainsi généré est transmis au buste par le corps 5 en appui direct.

L'exosquelette *Picker* est composé d'un bras à compensation de gravité portant la charge, et relié à une structure dorsale. Les efforts de réaction sont là aussi transmis aux hanches. Le bras est composé d'un ressort $S1$ qui génère un couple d'assistance entre les pièces 3 et 4. L'assistance est ensuite transmise par le support 5.

L'assistance à la marche *Keeogo* assiste son porteur en générant un couple d'assistance au niveau du genoux. Ceci est réalisé par deux moto-réducteurs $A1_A$ et $A1_B$. En appui sur les cuisses, ils transmettent les efforts d'assistance aux tibias au travers des corps 2_A et 2_B .

2.3.0.2 Les exosquelettes souples

Pour certaines applications, un effort plus faible est suffisant pour fournir l'assistance nécessaire au porteur. Le poids de la structure devient une problématique d'autant plus critique qu'il pénalise rapidement son porteur. Dans ces cas d'usages, l'utilisation d'une structure rigide n'est pas obligatoire. Dans cette situation, on retrouve les exosquelettes souples, dont la structure est assemblée à partir de matériaux très flexibles qui se déforment en cours d'utilisation [83]. Les technologies employées sont très légères et épousent le corps du porteur. Pour une déformation d'amplitude donnée, les efforts transmissibles restent cependant faibles.

Des structures souples ont été utilisées avec succès pour de nombreuses applications. Ces exosquelettes sont communément appelés "Exosquelettes souples", "Soft exoskeletons" ou "Exosuits". L'*Exosuit* de Harvard initialement développé pour des applications militaires [84] a été adapté avec succès à un usage médical de réhabilitation [85], mettant en évidence le potentiel de telles technologies. Un concept similaire se retrouve avec le système *Myosuit* [86], développé au ETH-Zurich en tant que MAXX [86].

Une structure souple pour les membres supérieurs est présentée dans [87]. Le système assiste la liaison du coude au travers d'une structure souple capable de générer un couple, et permet d'assister des tâches de la vie quotidienne. Le système fonctionne dans les deux sens de mouvements avec un unique moteur. La faible masse des composants et la position proche du corps font que l'inertie de la

structure a un impact minimal sur la cinématique naturelle de son porteur.

D'autres actionneurs utilisés pour les exosquelettes souples intègrent des technologies pneumatiques, comme des muscles artificiels [88], ou des chambres alvéolées en élastomère [89]. L'utilisation de composants élastiques pour assister le porteur est aussi largement employée. Le projet européen XoSoft [90] approfondit cette approche avec des bandes élastiques couplées à des embrayages pneumatiques [91] permettant de moduler l'assistance.

Le gant *IronHand*, proposé par Bioservo [92], est un exemple de structure souple employée actuellement dans le domaine industriel. L'assistance, actionnée par des câbles dans un gant de la même manière que fonctionnent nos tendons, permet d'améliorer la poigne de personnes affaiblies lors de tâches quotidiennes, ou faciliter le travail d'ouvrier sujets à de la fatigue musculaire.

Mais les structures souples impliquent également d'utiliser des technologies de capteurs alternatives. Par exemple, un encodeur standard ne peut pas fournir de mesure exploitable sur une structure déformable. Pour cette raison, de nouvelles approches pour extraire des données du système et des interactions avec son porteur sont nécessaires.

Des données peuvent être obtenues directement à partir des actionneurs, en utilisant une jauge de déformation montée sur une transmission par câble ou un capteur de pression dans un circuit pneumatique. Mais extraire des données directes du porteur ou de l'évolution cinématique de la structure reste complexe. Pour cela, l'utilisation des capteurs permettant de mesurer les mouvements du corps ou les forces d'interaction sont nécessaires, mais peuvent vite devenir invasifs et coûteux [93, 94, 95].

La transmission des forces d'assistance générées par l'exosquelette souple se reposent sur les articulations du corps. Comme la structure souple est entourée autour des membres du porteur, les forces sont transmises au travers des tissus et le long de la surface de contact. L'exemple Fig. 2.15a montre la structure de l'*Exosuit* qui consiste en différents morceaux de tissu cousus ensemble selon un schéma spécifique aux membres inférieurs. Lorsque le câble, situé au niveau du talon, est tiré, il génère un effort d'assistance sur le pied. La partie arrière de la cheville est tirée vers le haut tandis la jambes est poussée vers le bas. Les efforts de réaction sont ensuite transférés au pelvis qui est tiré vers le bas. Un couple est ainsi généré au niveau de la cheville, de la même manière que les muscles agissent au travers des ligaments.

Un exemple similaire est proposé dans [96], où des muscles pneumatiques qui génèrent l'effort d'assistance. Cet exemple est illustré Figure 2.15b.

2.4 Proposition de classification

En tant que technologie jeune, il existe encore un nombre important d'exosquelettes en cours de développement. De nombreux produits commercialisés sont issus de collaborations entre utilisateurs et concepteurs. L'un des nombreux exemples est le *Paexo Shoulder* (Fig. 2.9c) de la société Ottobock Industrials. Initialement concepteur de prothèses médicales, celle-ci s'est associée avec le constructeur automobile allemand Volkswagen pour développer une assistance de maintien des bras en l'air. Fort de leur succès, la société a depuis diversifié sa gamme. Dans les Tableaux 2.1 et 2.2 sont listés 75 exosquelettes identifiés comme ayant une potentielle utilisation industrielle. La table 2.1 référence les exosquelettes disponibles à la vente sur le marché, tandis que le Table 2.2 liste les exosquelettes en cours de développement. Ils sont classés selon le modèle, le constructeur ou développeur, l'origine géographique, la maturité, le poids, les membres du corps concernés par l'assistance, si la structure est rigide

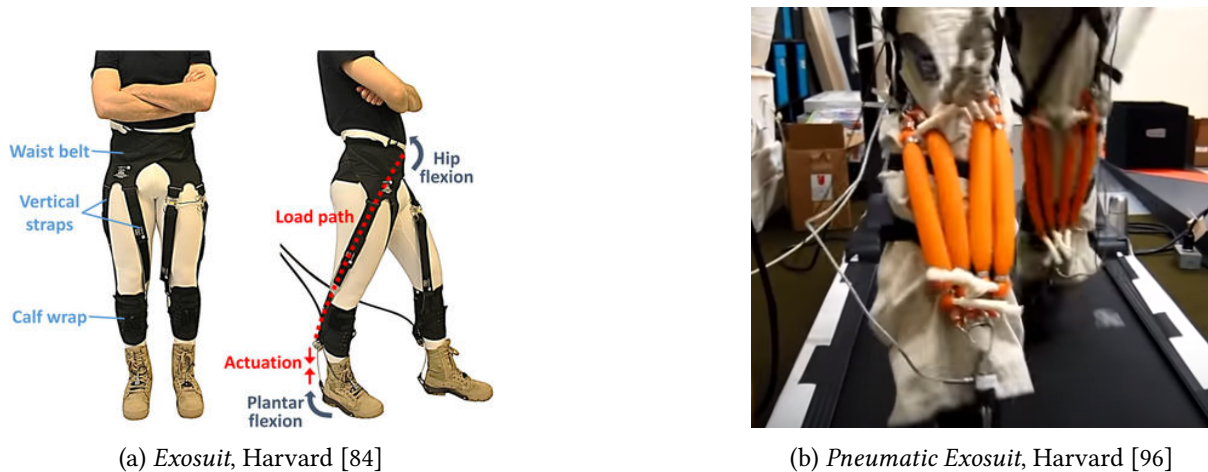


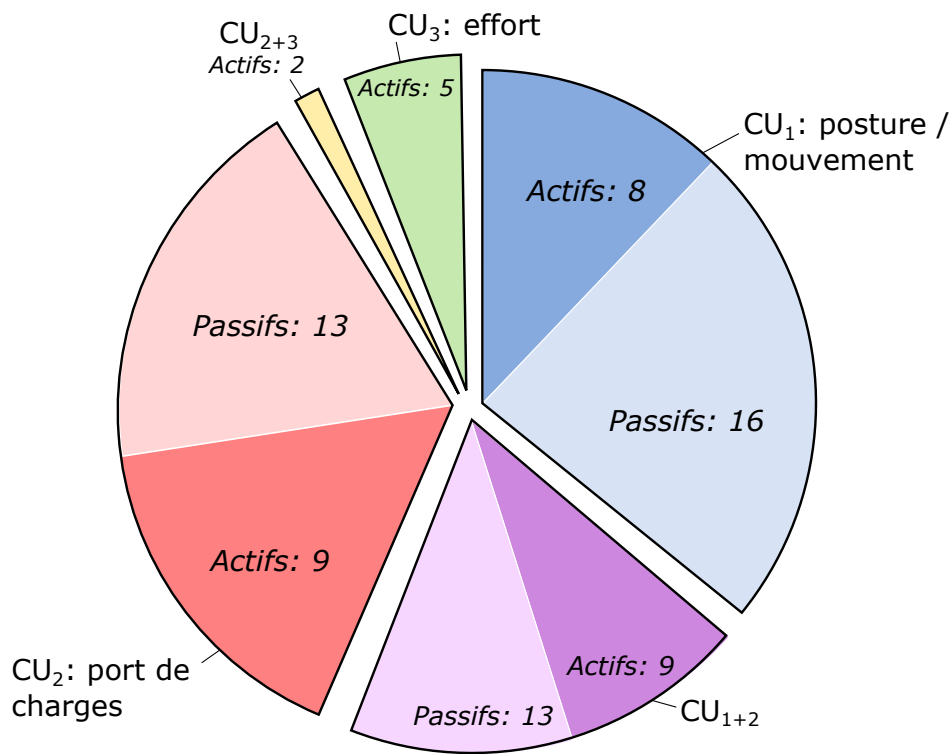
FIGURE 2.15 – Exemples d'exosquelettes souples actifs

ou souple, le mode de fonctionnement, l'énergie nécessaire à l'assistance, et les cas d'usage potentiels identifiés dans le chapitre précédent.

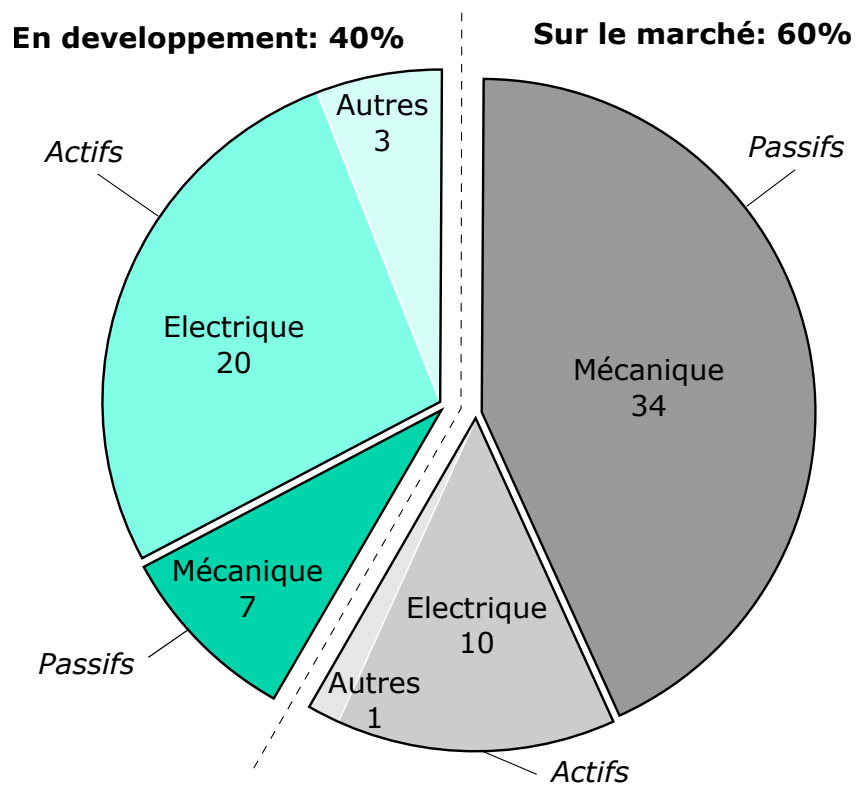
En ne prenant en compte que les exosquelettes disponibles sur le marché (Tab. 2.1), 62% sont identifiés comme pouvant être utilisés pour CU_1 , 56% pour CU_2 et seulement 7% pour CU_3 . Mais il faut remarquer que 24% sont compatibles pour un usage sur CU_1 et CU_2 . Concernant les exosquelettes en cours de développement présentés Tableau 2.2, 60% sont identifiés comme pouvant être utilisés pour CU_1 , 70% pour CU_2 et seulement 13% pour CU_3 . Mais ici encore, on retrouve 37% d'exosquelettes compatibles pour CU_1 et CU_2 , tandis que 7% peuvent être utilisés pour CU_2 et CU_3 .

La grande majorité des exosquelettes est aujourd'hui dédiée à CU_1 et CU_2 (Fig. 2.16a). Cela est en partie expliqué par la simplicité des cas d'usage, qui consiste à compenser le poids du corps ou d'un objet. Que ce soit celui du corps, ou d'un objet, la direction est constante si on considère que la posture verticale de l'opérateur est maintenue pendant la tâche. C'est également pour cette raison que de nombreux exosquelettes conviennent à ces deux cas d'usage simultanément. Cependant, pour limiter le poids et l'encombrement, il est important de choisir le modèle qui réponde au plus juste au besoin. Les exosquelettes capables de transmettre des efforts importants ont tendance à être volumineux et lourds, ce qui n'est pas nécessaire pour des assistances faibles de maintien postural par exemple.

Les exosquelettes industriels actuels sont majoritairement passifs, comme présenté à la Figure 2.16b. Ils représentent plus de la moitié des assistances disponibles sur le marché. Mais cette tendance est inversée pour les exosquelettes encore en cours de développement, qui eux sont composés à 77% de modèles actifs.



(a) Distribution des modes de fonctionnement par cas d'usage



(b) Distribution des types de fonctionnement

FIGURE 2.16 – Répartition des exosquelettes industriels existants

TABLE 2.1 – Liste d'exosquelettes industriels disponibles sur le marché ; Masse (kg), Structures (R=rigide, S=souple), CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement, CU_2 : Port/manutention de charges lourdes, CU_3 : Application d'effort d'assemblage

N°	Nom	Manufacturier	Pays	Masse	Mains	Bras	Épaules	Tête	Tronc	Jambes	Struct.	Fonct.	Energie	CU_1	CU_2	CU_3
1	Airframe [97] [62]	Levitate	EU	2.7			X				R	Passif	Méca.	X		
2	Armor-man 2 [98]	Tiltamax	EU	8.5		X	X				R	Passif	Méca.		X	
3	Atlas [99] [100]	Japet	France	/					X		R	Actif	Elec.	X		
4	BackX AC [50] [101]	SuitX	EU	4.5					X		R	Passif	Méca.	X	X	
5	BackX S [50] [101]	SuitX	EU	3.3					X		R	Passif	Méca.	X	X	
6	CarbonHAND [102] [70]	Bioservo	Suède	.	X						S	Actif	Elec.			X
7	Chairless Chair [103] [71]	Noonee	Switz.	3.3						X	R	Passif	Méca.	X		
8	Cinemaker [67]	Exhaust	France	9.1		X	X				R	Passif	Méca.		X	
9	Corfor [60]	Corfor	France	0.2					X		S	Passif	Méca.	X	X	
10	CRAY X [104]	German Bionic	Allem.	/					X		R	Actif	Elec.		X	
11	Exos [105]	Crimson Dynamics	Chine	2.5		X	X				R	Passif	Méca.	X		
12	Ekso Vest [106] [107]	Ekso Bionic	EU	4.3			X				R	Passif	Méca.	X		
13	Exo-muscle [108] [55]	Innophys	Japon	/					X		R	Passif	Pneum.	X	X	
14	Exo-Push [74]	RB3D	France	8.4		X	X		X	X	R	Actif	Elec.			X
15	Flex lift [61]	Kinetic Edge	EU	/					X		S	Passif	Méca.	X	X	
16	FLx [109] [110]	StrongArm Tech	EU	/					X		R	Passif	Méca.	X		
17	Fortis [68] [111]	Lockheed Martin	EU	12		X	X		X	X	R	Passif	Méca.		X	
18	HAL Care Support [59]	Cyberdyne	Japon	3.1					X		R	Actif	Elec.	X		
19	HAL Labor Support [59]	Cyberdyne	Japon	3					X		R	Actif	Elec.	X	X	
20	Hanger [67]	Exhaust	France	5.7		X	X				R	Passif	Méca.		X	
21	Hercule V3 [74]	RB3D	France	/		X	X		X	X	R	Actif	Elec.		X	
22	IronHAND [102] [70]	Bioservo	Suède	2.9	X						S	Actif	Elec.			X
23	Keeogo [3]	B-Temia	Quebec	/						X	R	Actif	Elec.	X		
24	Laevo v2.5 [112] [49]	Laevo	Pays-Bas	2.2					X		R	Passif	Méca.	X	X	
25	LegX [50]	SuitX	EU	6.2						X	R	Passif	Méca.	X		
26	Lex [113]	Astrid Bionix	Thaï.							X	R	Passif	Méca.	X		
27	Lifter [67]	EXHAUSS	France	5.8		X	X				R	Passif	Méca.		X	
28	Marine Mojo [114]	Mojo	EU	1						X	R	Passif	Méca.	X		
29	Mate [115]	Comau	Italie	4		X	X				R	Passif	Méca.	X		
30	NecProtech [116]	NecProtech	Nou. Zél.	/				X			R	Passif	Méca.	X		
31	ONIX [117]	Lockheed Martin	EU	/						X	R	Actif	Elec.	X	X	
32	Orbiter [67]	EXHAUSS	France	7.8		X	X				R	Passif	Méca.		X	
33	Paexo Shoulder [64]	Ottobock Industrials	Allem.	1.9			X				R	Passif	Méca.	X	X	
34	Paexo Thumb [64]	Ottobock Industrials	Allem.	/	X						S	Passif	Méca.	X		
35	Paexo Wrist [64]	Ottobock Industrials	Allem.	/	X						R	Passif	Méca.	X	X	
36	Picker [67]	EXHAUSS	France	/		X	X				R	Passif	Méca.		X	
37	Reliever [67]	EXHAUSS	France	7.9		X	X				R	Passif	Méca.	X	X	
38	ShoulderX [50] [118]	SuitX	EU	5.3			X				R	Passif	Méca.	X		
39	Skel'Ex [119] [63]	Skel'Ex	Pays-Bas	3.4			X				R	Passif	Méca.	X		
40	Transporter [67]	EXHAUSS	France	5.7		X	X				R	Passif	Méca.		X	
41	Uprise [46]	Mawashi	Quebec	/					X	X	R	Passif	Méca.		X	
42	V22 [109] [120]	StrongArm Tech	EU	0.9		X	X				R	Passif	Méca.		X	
43	Vizo [72]	Icebo	France	/				X			R	Passif	Méca.	X		
44	Wieldy [66] [121]	Beijing Wieldy CES	Chine	20		X	X				R	Passif	Méca.		X	
45	Worker [67]	EXHAUSS	France	8.9		X	X				R	Passif	Méca.		X	

TABLE 2.2 – Liste d'exosquelettes industriels disponibles sur le marché ; Masse (kg), Structures (R=rigide, S=souple), CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement, CU_2 : Port/manutention de charges lourdes, CU_3 : Application d'effort d'assemblage

N°	Nom	Manufacturier	Pays	Masse	Mains	Bras	Épaules	Tête	Tronc	Jambes	Struct.	Fonct.	Energie	CU_1	CU_2	CU_3
46	Active arms [122]	Robo-Mate	Projet Eu.	4.6		X	X				R	Actif	Elec.		X	
47	Active trunk [57]	Robo-Mate	Projet Eu.	11					X		R	Actif	Elec.	X	X	
48	Archelis [98]	Japon Polymer Tech	Japon	/						X	R	Passif	Méca.	X		
49	Exo Back [123]	RB3D	France	/					X		R	Actif	Elec.		X	
50	EXO-Jacket 2.0 [124]	Fraunhofer-Institut	Allem.	10		X	X				R	Actif	Elec.		X	X
51	Guardian XO [76]	Sarcos	E-U	/	X	X	X		X	X	R	Actif	Elec.			X
52	Hexar-CR50 [125]	Hexar systems	Corée du S.	26					X	X	R	Actif	Elec.		X	
53	Hexar-CR10H [125]	Hexar systems	Corée du S.	/						X	R	Actif	Elec.	X	X	
54	Hexar-HL35 [125]	Hexar systems	Corée du S.	26		X					R	Actif	Elec.		X	
55	Hexar-WA20 [125]	Hexar systems	Corée du S.	5.5						X	R	Actif	Elec.	X		
56	HULC [126]	Lockheed Martin	E-U	24		X	X		X	X	R	Actif	Hydrau.		X	
57	H-Wex [127]	Hyundai	Corée du S.	/					X		R	Actif	Elec.	X	X	
58	Lift-Assistance [53]	Lowe's / Virginia Tech	E-U	/					X		R	Passif	Méca.	X	X	
59	Model A [58]	ATOUN	Japon	6.7					X		R	Actif	Elec.	X	X	
60	Model AS [58]	ATOUN	Japon	/		X	X		X		R	Actif	Elec.	X	X	
61	Model Y [58]	ATOUN	Japon	4.4					X		R	Actif	Elec.	X	X	
62	Passive Arms [128]	Robo-Mate	Projet Eu.	7.2		X	X				R	Passif	Méca.		X	
63	PLN-01 [129]	Panasonic	Japon	/						X	R	Actif	Elec.	X		
64	Power Assist Glove [69]	Gloria Mundi Care	Danem.	0.6	X						S	Actif	Pneum.			X
65	Power Loader Light [129]	Panasonic	Japon	/		X	X		X	X	R	Actif	Elec.		X	
66	Shiva [130]	SNCF, Ergosanté Tech	France	5		X	X				R	Passif	Méca.	X	X	
67	Soft Exosuit [131]	WYSS Soft Exosuit	E-U	/						X	S	Actif	Elec.	X		
68	Spexor [54] [51]	Spexor	Projet Eu.	/					X		R	Passif	Méca.	X	X	
69	SuperFlex [132] [133]	SRI International	E-U	3.6						X	S	Actif	Elec.	X		
70	H-Vex [134]	Hyndai	Corée du S.	2.5			X				R	Passif	Méca.	X		
71	Walking Assist [127] [135]	Honda	Japon	2.7						X	R	Actif	Elec.	X		
72	XoArms [90]	IIT	Italie	6		X	X				S	Actif	Elec.		X	
73	XOS2 [136]	Raytheon	E-U	95		X	X		X	X	R	Actif	Hydrau.		X	X
74	XoTrunk [137] [138]	IIT	Italie	6					X		S	Actif	Elec.	X	X	
75	ZUI [58]	ATOUN	Japon	/			X				R	Passif	Méca.	X	X	

Il n'existe à ce jour aucun exosquelette spécifiquement dédié aux trois cas d'usage. La complexité nécessaire pour répondre à toutes les contraintes d'utilisation ne permet pas d'envisager une solution utilisable dans un contexte industriel. Les variations de l'effort et la dextérité nécessaire pour respecter le temps de réalisation de la tâche sont encore des freins importants. C'est pourquoi la plupart des exosquelettes actuels disponibles sur le marché sont confinés à des tâches simples telles que le maintien de bras en l'air pour une plage d'efforts réduite. L'assistance à l'effort dans le domaine industriel concerne presque seulement les membres supérieurs. Les applications où il est nécessaire de forcer avec les jambes en dehors du port de charge sont très peu nombreuses.

Cet état de l'art met en évidence de nombreux points. Le premier montre que les systèmes passifs mécaniques permettent de rendre abordable la technologie des exosquelettes avec des solutions légères, simples et peu coûteuses. Mais ils sont trop limités dans leur fonctionnement, très peu adaptatif en cas de modification des conditions de travail et l'assistance reste modeste. Les modèles actifs eux disposent d'une puissance utile importante et adaptable, au détriment du poids et du coût. Une seconde conclusion de cette étude montre que peu de solutions assistent les efforts autres que le port de charge sur l'intégralité des membres supérieurs. La plupart des systèmes existants assistent des petites chaînes cinématiques courtes, comme celles de la main ou de l'épaule. Mais cela soulève une autre question concernant les exosquelettes dont l'assistance est localisée. Il est difficile de certifier que le port de tels systèmes ne déplace pas le problème sur d'autres parties du corps. Étendre l'assistance permettrait de contourner/atténuer ce problème.

Finalement, on constate que les systèmes passifs sont préférés dans les environnements industriels. Ils sont légers, simples à entretenir et facile d'utilisation. De plus, ils n'intègrent pas de capteurs onéreux, leur coût est attractif et le déploiement ne nécessite pas de support technique spécifique autre que la maintenance mécanique. D'un autre côté, les exosquelettes actifs offrent des avantages considérables. Ils génèrent des profils d'effort variables en intégrant des contrôles HIL (Human In the Loop), contrairement aux systèmes purement mécaniques qui requièrent des pré-réglages manuels. Mais la maintenance requiert des techniciens qualifiés. Le poids est également plus élevé, notamment causé par la masse des actionneurs, du stockage d'énergie, de la centrale de contrôle et des capteurs.

Pour réduire l'invasivité, l'encombrement, la masse et la complexité, la plupart des exosquelettes n'impliquent que les membres concernés par l'assistance. Les efforts de contre-réaction sont distribués aux parties fortes du corps les plus proches. Le principal inconvénient est le risque de sur-sollicitation de certains membres non concernés par l'assistance mais périphériques aux zones de transmission des efforts. Ces efforts peuvent provenir du poids de l'exosquelette ou des efforts internes générés par l'exosquelette lui-même. Les exosquelettes de corps complet permettent de transmettre ces forces directement au sol à travers les jambes, mais la complexité globale de l'exosquelette est drastiquement augmentée. La boucle d'effort doit être la plus courte possible pour limiter le nombre de liaisons, et ainsi minimiser la complexité et le poids.

Les exosquelettes capables d'appliquer un effort sur le milieu extérieur sont uniquement actifs, et très peu adaptés aux contraintes industrielles identifiées. Des systèmes entièrement robotisés comme *Guardian XO* ou *Exo Push* permettent d'appliquer un effort vers le milieu extérieur, en renvoyant l'effort de réaction au niveau du sol. Mais ils sont encombrants et entravent les déplacements de l'utilisateur.

2.5 Choix d'un cas d'étude

Avec l'évolution et l'optimisation des lignes à l'horizon 2020, certains postes sont automatisés tandis que d'autres redeviennent manuels. Pour la plupart des postes présents sur les lignes de montage, très peu sollicitent les membres inférieurs. L'assistance des membres supérieurs représente donc ici l'enjeu.

Au regard des différents besoins, c'est finalement la problématique d'application d'effort qui a été retenue. Il est difficile d'évaluer le nombre de postes concernés tant cette contrainte est générique, mais cela reflète aussi l'intérêt de telles solutions en terme d'impact.

Pour définir un cadre d'étude, une recherche plus approfondie des postes concernés par ce type de besoin a été réalisée. L'objectif est de définir des critères de classification, pour ensuite sélectionner les postes susceptibles de servir de plate-forme d'expérimentation.

2.5.1 La problématique d'application d'efforts

Là aussi, une classification est nécessaire, car tous les efforts ne sont pas équivalents. Les différences majeures concernent les membres impliqués, le type d'effort et la direction. A partir des études de postes réalisées et des remontées de besoins faites par les ergonomes, plusieurs postes sont identifiés et listés Tableau 2.3.

TABLE 2.3 – Besoins exprimés par les ergonomes concernant les postes de la ligne de Montage, par ordre décroissant d'importance.

Problématique identifiée	Poste concerné	Effectif / usine
Effort frontal important	Pose des panneaux de portes	env. 4 postes
Effort frontal	Encollage des vitres de custodes	env. 2 postes
Efforts frontal	MEP et plaquage des pare chocs avant/arrière	env. 2 postes
Efforts de clippage divers	Clippage des becquets	env. 1 poste
Efforts de clippage divers	Garnitures latérales de coffre, pied milieu, montant de baie	env. 1-2 postes
Efforts de clippage divers	Enjoliveurs planche de bord	env. 1 poste
Efforts de clippage divers	Clippage air bag volant	env. 1 poste
Efforts de clippage divers	MEP baguette de porte/air bump	env. 2 postes
Efforts de clippage divers	Garnitures bas de marche/passage de roues	env. 2 postes

La problématique concernant l'application d'un effort de poussée semble être commune à de nombreux postes, et notamment à la pose des garnitures de portes qui est en tête de liste des besoins. C'est donc ce poste qui est sélectionné comme cas d'usage pour le développement d'une nouvelle assistance par exosquelette.

2.5.2 Description du poste sélectionné

L'opération visée au niveau de ce poste concerne le clipsage de la garniture de la porte. Après avoir positionné correctement la pièce qui peut être réalisée dans différents matériaux, un effort important doit être appliqué pour clipser toutes les agrafes de fixation de la garniture dans le châssis de la porte. Aujourd'hui, et malgré les consignes dissuasives, les opérateurs réalisent l'opération en frappant avec la paume de la main. Plusieurs causes pouvant être à l'origine de cette mauvaise méthodologie ont été identifiées :

- Formation qui perpétue les habitudes de chocs ;
- Problème de sensibilisation aux dégâts corporels que cela peut poser ;
- Stratégie opératoire pour gagner du temps ;
- Convenance personnelle, sans prise en compte des éventuelles conséquences corporelles ;
- Nécessité produit, choix de surqualité pour valider le retour sonore et tactile du clip ;
- Position basse de certains clips, c'est peut-être plus simple de frapper le bras tendu vers le bas plutôt que de s'accroupir.

A l'aide d'un peson, l'ergonome responsable du poste a mesuré que l'effort nécessaire au clipsage de la garniture de porte. Plusieurs appuis successifs sont nécessaires (entre trois et quatre), chacun d'une valeur de 120N. La posture moyenne des opérateurs lors de cette phase est présentée Figure 2.17.



FIGURE 2.17 – Configuration de l'opérateur lors de l'application de l'effort nécessaire au clipsage des garnitures de porte

De nombreuses tâches annexes composent le poste. Elles sont listées dans le Tableau 2.4, et misent en relation avec les contraintes spécifiques associées.

TABLE 2.4 – Liste des tâches annexes du poste sélectionné, mises en relation avec leurs contraintes principales associées

Tâches annexes	Principale(s) contrainte(s) associée(s)
Saisie de la garniture et de la feuille d'étanchéité dans le kaman en bord de ligne	Mobilité de l'opérateur sur plusieurs mètres, rotations du corps dans l'espace
Manipulation d'un visseuse sans fil	Dextérité de la main pour fermer les doigts et rotations du poignet libres
Manipulation de diverses petites pièces plastiques	Dextérité des doigts
clipsage de nombreuses pièces plastiques	Besoins d'un retour sensoriel tactile
Manipulation et positionnement de pièces souples	Dextérité importante des doigts et du poignet
Déplacement de la servante	Mobilité de l'opérateur, déplacement à reculons

Plusieurs facteurs d'apparition de TMS sont identifiés. Du fait de la cadence imposée et du temps passé sur le poste, la gestuelle est classée comme répétitive (EN 1005-5, 2007 ; EN 1005-5, 2007). Ensuite

viennent les chocs de la paume de la main, qui se répercutent dans tout le membre supérieur. Enfin s'ajoute l'effort important nécessaire au clipsage, qui sollicite musculairement tout le membre supérieur. En conclusion, ce poste est potentiellement fortement source de TMS.

L'objectif est de concevoir un exosquelette qui soit capable d'assister l'opérateur lors de l'opération de clipsage, mais sans perturber les tâches annexes présentées Tableau 2.4.

2.6 Déploiement de la technologie exosquelette

L'utilisation des exosquelettes comme assistance physique permet de réduire les risques d'apparition de maladies professionnelles, et notamment des TMS. Mais ces solutions agissent en contact direct avec leur porteur, et il est important d'en évaluer les risques pour que leur utilisation reste bénéfique. Des outils de mesure permettent de collecter les données nécessaires à l'évaluation de cette interaction homme/exosquelette. A cela, il est possible de coupler des outils de simulation. Cependant, les protocoles mis en place ont également une grande importance dans la validation de telles solutions d'assistance. Les tests coûteux et contraignants doivent être minimisés et optimisés, afin d'obtenir une évaluation fiable rapidement.

2.6.1 Évaluation et outils de mesure

Comme beaucoup d'autres innovations auparavant, ce type d'assistance physique se démocratise et atteint aujourd'hui le secteur industriel et les utilisateurs particuliers. Si les cas d'application et les contraintes sont différents, la validation reste une étape indispensable avant un possible déploiement [139].

Deux types de mesure différents sont utilisés. Les premiers, objectifs, sont basés sur l'utilisation de capteurs de suivi de l'activité physique du porteur pour en extraire une évaluation des indicateurs de performance de l'assistance. Les seconds, subjectifs, sont quand à eux basés sur le ressenti personnel suite à l'utilisation de l'assistance. Les données peuvent être récupérées sous forme de questionnaires, d'échelles ou d'entretiens.

2.6.1.1 Outils de mesure objectifs

Étude du mouvement

L'analyse des mouvements permet de mesurer différents indicateurs de performance des solutions portatives telles que les exosquelettes. L'un d'entre eux est la *transparence*, c'est à dire la capacité de la structure à suivre les mouvements de son porteur sans les perturber. Son évaluation peut reposer sur la vitesse et la fluidité des mouvements [140]. Les amplitudes articulaires nécessaires pour réaliser la tâche, si elles ne sont pas garanties en portant l'assistance, peuvent être compensées par une modification de l'équilibre postural [141]. Il est alors possible de comparer les relevés cinématiques des membres avec et sans exosquelette, pour en déduire l'impact sur la transparence. Pour évaluer ces indicateurs, plusieurs outils sont disponibles :

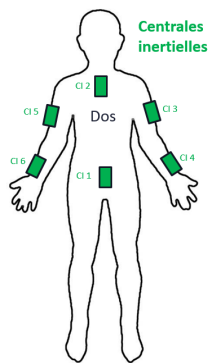
- **Les gyroscopes** renseignent l'orientation 3D du membre sur lequel ils sont fixés, par rapport à une origine de référence établie lors du calibrage.
- **Les accéléromètres** mesurent les accélérations 3D du membre sur lequel ils sont attachés (gyromètres dans le cas des rotations). Il est possible d'en déduire les vitesses, positions et orientations par

intégration, mais la précision se dégrade rapidement avec la durée d'intégration.

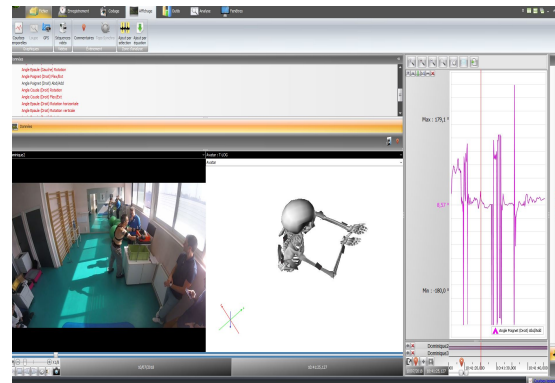
- **Les magnétomètres** mesurent la direction d'un champ magnétique. Ils sont utilisés pour suivre l'orientation d'un référentiel par rapport à l'environnement, et compenser la dérive des gyroscopes.

- **Les centrales inertielles** permettent d'exploiter au mieux les possibilités de ces capteurs. Généralement présentés sous forme de boîtiers, sans fils pour la plupart, elles sont composées d'un couplage de différents capteurs et d'un système de communication. Les données sont transmises à un système de traitement extérieur. On y retrouve souvent un gyroscope, un accéléromètre et un magnétomètre

Par exemple, pour suivre l'activité des membres supérieurs d'un opérateur, hormis les mouvements des mains, au moins six capteurs sont nécessaires (Fig. 2.18a). *CI1* et *CI2*, respectivement fixés au bassin et au milieu des omoplates, permettent par comparaison relative de déterminer l'inclinaison du dos par rapport au bassin. *CI3* et *CI5*, fixés à chaque bras, permettent de connaître leur évolution par rapport au dos. *CI4* et *CI6*, attachés à chaque avant-bras, mesurent l'évolution de ceux-ci par rapport à leur bras respectif. A partir des données de tous les capteurs, il est ensuite possible d'enregistrer les mouvements des principaux solides du squelette du porteur pour les reproduire en 3D sur ordinateur et les exploiter (Fig. 2.18b).



(a) Exemple de placement des centrales sur les membres supérieurs du porteur pour une activité bras en l'air



(b) Enregistrement et reconstitution du squelette dans le logiciel Captiv

FIGURE 2.18 – Exemple d'utilisation des centrales inertielles TEA Captiv pour le suivi d'activité des membres supérieurs

L'avantage majeur de ce moyen de mesure est qu'il est porté par l'opérateur en totale autonomie tant que les centrales de mesure restent à portée du système d'enregistrement. Cependant, ces capteurs sont sensibles aux champs magnétiques important dans les environnement industriels, aussi la précision et les erreurs de mesure peuvent devenir rédhibitoires. Certains boîtiers sont volumineux, et leur encombrement peut s'avérer incompatible si le porteur est équipé d'une tenue proche du corps ou d'un exosquelette.

Les systèmes de "motion capture" enregistrent le mouvement du sujet grâce au suivi de marqueurs placés sur le corps, par reconnaissance de forme ou par numérisation 3D. Un logiciel de traitement traduit ensuite ces données capteurs pour en extraire les cinématiques articulaires. Ces méthodes peuvent offrir une précision élevée, mais la contrepartie est qu'elles nécessitent de suivre le sujet en continu avec la caméra, dans un espace dégagé.

Capteurs d'effort

Il est possible de compléter les informations de mouvement avec les efforts. Des capteurs placés

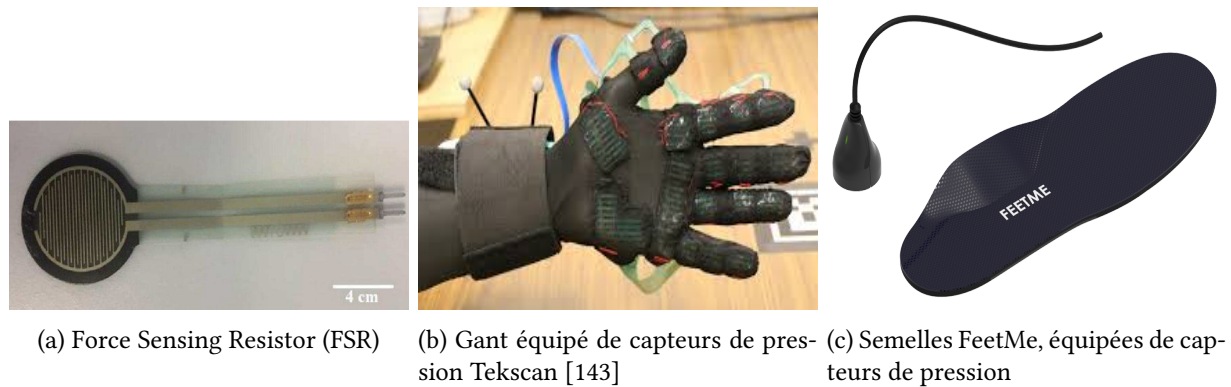


FIGURE 2.19 – Exemples de moyens de capture d'efforts

entre le sujet et l'exosquelette, ou entre le sujet et son environnement permettent d'estimer les forces d'interaction. Plusieurs technologies de capteurs peuvent être utilisées. Pour éliminer un maximum d'inconnues, il faut placer des capteurs sur toutes les surfaces sujettes à des forces de contact. Pour un opérateur sans équipement d'assistance, il s'agit des mains et des pieds. Les Force Sensing Resistors (FSR) illustrés Figure 2.19a sont des capteurs de pression de faible épaisseur qui peuvent être intégrés à des tissus [142]. Des gants (Fig. 2.19b) ou des semelles de chaussures (Fig. 2.19c) en sont notamment équipés. L'enjeu réside dans le fait que pour obtenir une mesure précise, il faut recouvrir toute la surface de contact. Cela implique l'intégration d'un grand nombre de capteurs, qui peuvent entraîner des risques de perte de sensation et de dextérité.

Effort musculaire

L'activité musculaire est également un indicateur très utile. Les capteurs type SEMG (Surface ElectroMyoGraphy) mesurent le courant de surface généré par un muscle pour en déduire son activité (Fig. 2.21a). Les données utilisées sont principalement comparatives, elles mettent en évidence une variation de l'activité musculaire avec ou sans équipement d'assistance. Mais en déterminant la force maximale volontaire de chaque sujet, il devient possible de normaliser le pourcentage d'effort employé pour réaliser une tâche et ainsi comparer entre individus. Chaque capteur cible un unique muscle, avec de meilleurs résultats de mesure pour les fibres musculaires de surface. Cette technologie nécessite une étude préliminaire pour déterminer quels sont les muscles les plus pertinents (Fig. 2.21b).

Dépense énergétique globale

Pour une mesure plus globale de l'activité physique, il est possible de mesurer la consommation en oxygène et le rythme cardiaque. Très employés dans le milieu du sport de haut niveau, ces indicateurs permettent d'estimer la dépense énergétique totale du corps [144].

Le Tableau 2.5 résume les principaux avantages et inconvénients des moyens de mesure objectifs courants.

L'inconvénient principal de ces outils réside dans le fait qu'ils doivent être en nombre important pour obtenir des données exploitables fiables, ce qui devient impossible lorsque l'on cherche à mesurer l'activité du corps complet. Pour palier au manque de mesures et limiter le nombre d'inconnues sans pour autant augmenter le nombre de capteurs, une solution consiste à coupler les données avec un modèle de corps humain numérique. Ainsi, les informations de position articulaire et les efforts d'interaction, permettent de remonter aux efforts musculaires et articulaires dans le corps complet.



(a) Capteur SEMG, comprenant les électrodes et le boîtier de communication sans fil Captiv

(b) Exemple de placement des capteurs SEMGs sur les muscles identifiés du porteur pour une activité bras en l'air

FIGURE 2.20 – Utilisation des capteurs SEMG pour le suivi d'activité des membres supérieurs lors de tâches bras en l'air

TABLE 2.5 – Comparatif des outils de mesure objectifs les plus courants

	Avantages	Inconvénients
Centrale inertielle	Mobile	Sensible aux champs magnétiques, encombrant
Motion capture	Précision, robustesse des données	Nécessite un espace dégagé, une installation spécifique
SEMGs	Mesure précise de l'activité d'un muscle	Préparation nécessaire de la peau (rasage, nettoyage), sensible à la transpiration, limité aux muscles de surface
Consommation d'oxygène	Indicateur métabolique global	Sensible aux variations extérieures, équipement nécessaire lourd
Rythme cardiaque	Indicateur métabolique global, équipement simple d'accès et de prise en main	Sensible aux variations extérieures
Capteurs efforts	Données récoltées en usage réel	Traitement complexe

2.6.1.2 Simulation

Pour mesurer l'impact biomécanique et ergonomique d'une assistance, il est nécessaire d'avoir le maximum de données sur la dépense énergétique et la cinématique des mouvements. Mais les outils de mesure objectifs sont contraignants à utiliser, et nécessitent de nombreux sujets de tests pour que les données soient représentatives. De plus, la multiplication des capteurs sur un même sujet n'est pas toujours possible selon sa tâche ou l'assistance qu'il porte. Pour palier au manque d'informations et permettre d'évaluer l'impact d'une assistance sur son porteur, des logiciels de simulation sont disponibles. Un mannequin, virtuel, est soumis aux mêmes conditions de travail que le futur porteur de l'assistance. L'exosquelette est ensuite ajouté au mannequin dans la simulation. Il est alors possible d'estimer directement les forces d'interaction et la charge physique sur le mannequin ci celui-ci est suffisamment détaillé.

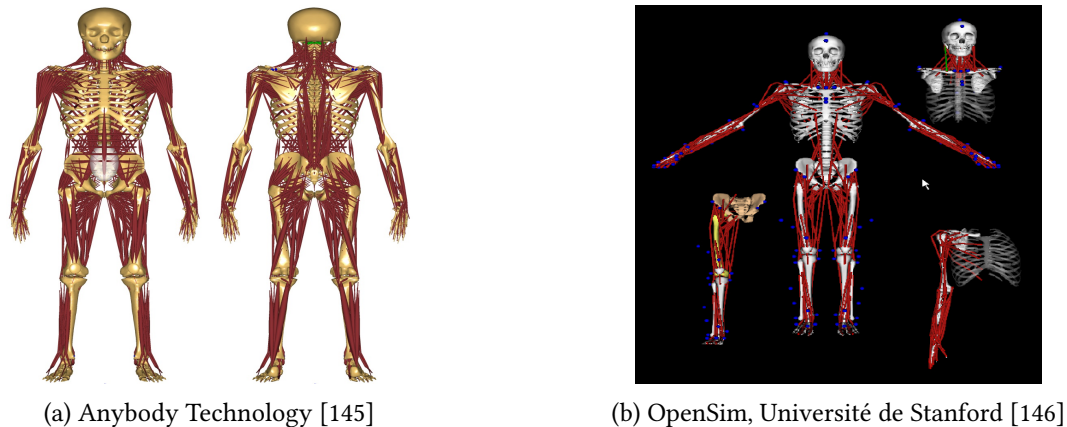


FIGURE 2.21 – Logiciels de simulation de modèle humain

2.6.1.3 Outils de mesure subjectifs

Si les mesures objectives permettent d'estimer la dépense énergétique, elles ne prennent pas en compte le ressenti personnel du porteur. Mais en tant qu'assistance personnalisée, portée sur de longue période, il est nécessaire que le futur porteur puisse également donner son avis sur les essais. De plus, contrairement aux mesures physiologiques, ces outils ne requièrent aucun équipement et sont particulièrement adaptés pour du suivi sur le long terme et la détection d'anomalie. L'échelle de BORG, très répandue, a pour objectif d'évaluer l'effort perçu en l'évaluant sur une échelle quantifiée [147]. Les questionnaires standards (EUROQOL 5 dimensions, NASA TLX, etc.) ou développés en interne par les sociétés utilisant les exosquelettes, permettent de la même manière de formaliser le ressenti d'une personne sur la tâche qu'il vient d'accomplir et si l'assistance en facilite la réalisation ou non. Les entretiens individuels, en face-à-face, sont aussi un moyen de collecter les informations. La discussion permet d'approfondir certaines remarques et points de vue, chose qu'un questionnaire ne peut pas complètement retranscrire.

2.6.2 Protocoles de mesure

La diversité des cas d'usage, l'anatomie humaine et les méthodologies de tests sont autant de facteurs qui rendent la validation des exosquelettes industriels délicate. Habituellement, les tests de systèmes mécatroniques sont de la responsabilité du fournisseur. Mais il n'existe à l'heure actuelle aucun standard, ce qui pousse les utilisateurs à réaliser leurs propres tests selon leur cas d'usage.

Deux principales approches sont aujourd'hui utilisées. La première commence par des tests subjectifs, suivi de tests objectifs si les premiers retours sont positifs. Cette méthodologie permet de garantir un certain niveau d'acceptabilité des solutions retenues. Cependant, l'inconvénient majeur vient du fait que le ressenti personnel prend une part très importante dans les premières étapes de sélection, et qu'il est nécessaire d'avoir un large échantillon pour s'assurer que le ressenti reflète bien celui du plus grand nombre. Une seconde approche consiste plutôt à mener des tests rigoureux à chaque étape, en mêlant mesures objectives et subjectives tout au long du processus d'évaluation.

La première phase dans la validation d'un exosquelette commence par la sélection d'un dispositif approprié. A partir des besoins exprimés par les ergonomes, ainsi que des historiques médicaux liés à ces postes, le cas d'usage nécessitant une assistance est clairement identifié. Les objectifs de réduction

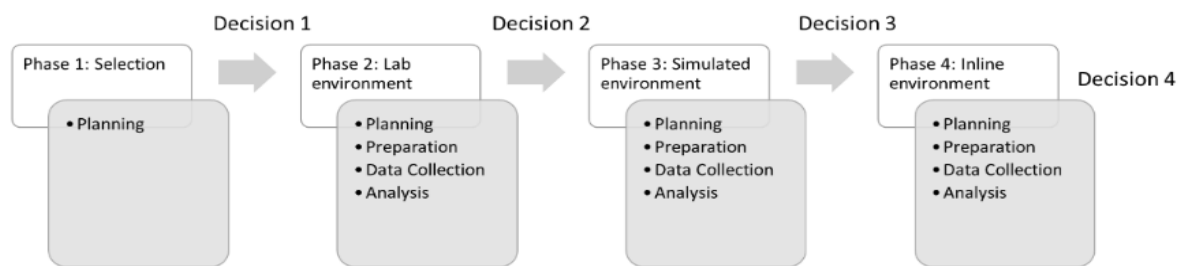


FIGURE 2.22 – Phases de test pour de déploiement d'exosquelettes à PSA [4]

du nombre de maladies professionnelles de l'entreprise doivent assurer le portage du projet pendant les phases suivantes. Vient ensuite l'étude des solutions disponibles sur le marché qui annoncent répondre aux besoins du cas d'usage spécifié.

La seconde phase est le test de l'exosquelette en environnement contrôlé. Le but de cette phase de test est de valider les fonctions basiques du dispositif et son acceptabilité par l'utilisateur. Elle comprend le choix du lieu et des éventuels équipements nécessaires, le recrutement des volontaires pour les tests, la sélection des méthodologies et protocoles, la constitution de l'équipe d'expertise, l'analyse des données et la rédaction d'un rapport de test. Une fois l'analyse effectuée, les experts et managers étudient les résultats. Ils décident alors de passer à l'étape suivante ou d'abandonner cet exosquelette pour ce cas d'usage. Dans le cas d'une collaboration avec le fournisseur, un retour des résultats de test peut être fait pour participer à l'évolution du produit.

Lors de la phase 3, l'environnement de test est recrée au plus proche de celui du cas d'usage spécifié. Toutes les tâches annexes, les outils, les composants du postes doivent être présents. Les volontaires pour les tests sont sélectionnés parmi des personnes expérimentées sur le cas d'usage. Un plan de test est préparé incluant les experts, une sélection des indicateurs de performance, les méthodologies et protocoles. Toutes les séquences d'opération et scénarios de tests sont anticipés. Les données mesurées sont ensuite collectées selon les protocoles définis. Dans la majorité des cas, les études comparatives avec / sans exosquelette sont préférées pour limiter les approximations nécessaires à la normalisation des données entre individus. Les données sont ensuite comparée pour chaque testeur. Cette phase est centrale dans la validation d'un exosquelette industriel. Les données collectées sont analysées en profondeur, aboutissant sur des rapports détaillés permettant d'évaluer la performance du dispositif. Cette évaluation repose, entre autres, sur cinq indicateurs de performance [148] :

- **L'impact**, qui correspond aux effets directs sur l'opérateur ;
- **L'appropriation**, qui caractérise la facilité de prise en main et d'appropriation de l'équipement ;
- **L'utilité**, qui évalue les conséquences de l'utilisation de l'assistance sur les performances industrielles ;
- **L'utilisabilité**, qui évalue la facilité d'utilisation de l'équipement au quotidien ;
- **La sécurité**, qui évalue les risques pour l'opérateur et son environnement.

Une fois l'exosquelette validé en Phase 3, il peut ensuite passer à la suivante.

La Phase 4 correspond à l'utilisation de l'exosquelette en condition réelle, sur le poste identifié du cas d'usage. Cette phase consiste principalement à déployer le dispositif sur plusieurs opérateurs pour des durées d'utilisation variées. Après chaque cycle d'utilisation, les retours subjectifs sont collectés et analysés. A l'heure actuelle, cette phase est la dernière étape d'implantation d'un exosquelette dans

l'industrie automobile. Il est cependant important de noter que les effets à long terme du port de l'exosquelette sont encore une question ouverte dans le domaine de la recherche.

La validation d'un exosquelette implique un protocole rigoureux, nécessaire pour s'assurer que le dispositif testé répond aux attentes. Mais les variétés de cas d'usage et d'utilisateurs impliquent également de vérifier que le port de l'exosquelette ne va pas avoir d'autres effets néfastes sur son porteur. La diversité et le nombre de capteurs nécessaires rendent le processus de validation coûteux et chronophage. De plus, une nouvelle validation peut s'avérer obligatoire si des modifications structurelles sont apportées au dispositif.

2.7 Objectifs de thèse

Dans un contexte d'amélioration de la flexibilité et adaptabilité des moyens de production industriels, les exosquelettes représentent une nouvelle approche pour préserver la santé des opérateurs. Comme l'ont montré l'étude de besoins et l'état de l'art, les usages sont aussi variés que les technologies mises en oeuvre. L'encombrement, et les risques de collision avec l'environnement ou le véhicule, représente un frein majeur pour une structure externe portée tels que les exosquelettes. A cela s'ajoute l'autonomie, et la transparence nécessaire pour garantir une qualité de travail au moins égale à celle sans dispositif. La validation étant un processus long et coûteux, il faut au préalable s'assurer que la conception répond aux critères attendus.

Beaucoup d'exosquelettes sont aujourd'hui développés sur-mesure, ce qui rend parfois complexe la question d'adaptabilité à un cas d'usage différent. Les itérations de conception sont pour la plus part liées à une description trop succincte des objectifs d'assistance et des contraintes du poste. Par conséquent, le processus de conception d'un exosquelette doit s'appuyer sur un cahier des charges fonctionnel explicite afin de s'assurer de sa pertinence. A partir de l'état des lieux de la technologie des exosquelettes industriels, ce travail de thèse a pour objectif la formalisation du processus permettant d'obtenir un concept d'exosquelette adapté aux besoins :

- Identifier des règles de conception centrées utilisateurs à partir des différents critères d'évaluation définis. Les différents tests menés sur des dispositifs disponibles sur le marché ou en développement ont permis de récolter de nombreuses remarques et problématiques, qui seront regroupées et classées. Des règles génériques en seront déduites pour ensuite être incorporées dans le processus de formalisation d'un nouveau concept exosquelette.
- Formalisation des différentes étapes nécessaires à l'obtention d'un concept d'exosquelette adapté aux attentes industrielles. Chaque étape sera détaillée, en intégrant les règles de conception correspondantes. Le but est d'assister les choix en proposant une vision élargie des différentes possibilités pour chaque étape clé.
- Appliquer ce formalisme au cas d'usage identifié comme n'ayant aujourd'hui aucune solution satisfaisante. Le concept ainsi obtenu sera ensuite prototypé.

Le positionnement de cette thèse a également un fort enjeu technologique, car on constate aujourd'hui un manque de solution d'aide physique à l'application d'effort. D'après l'étude du marché, il est peu probable qu'une solution entièrement passive convienne. Il faut donc trouver un compromis permettant d'allier les capacités d'un exosquelette actifs pour la puissance et la versatilité, tout en conservant les faibles poids et coût d'un système passif.

2.8 Conclusions du positionnement

La technologie des exosquelettes se démocratise dans le milieu industriel, avec aujourd'hui déjà un nombre conséquent de dispositifs. De grands axes de conception ont pu être identifiés, aboutissant sur un regroupement par description technologique. Nous avons proposé une classification pour les 75 exosquelettes identifiés comme potentiellement utilisables en contexte industriel, permettant ainsi de faciliter le choix d'une assistance adaptée aux besoins tout en offrant un outil d'analyse de l'évolution de cette technologie. Nous avons ainsi mis en évidence certaines tendances dans la conception de tels types d'assistance. Nous avons ensuite mené une étude plus approfondie sur les technologies employées, en détaillant pour chacune les avantages et inconvénients qui y sont associés. Un premier constat montre que les exosquelettes actifs offrent une bien meilleure versatilité et génèrent des efforts plus importants. Ils sont cependant encore peu adaptés à une utilisation en contexte industriel. Leur poids élevé, et les difficultés de contrôle, néfastes sur la transparence, sont autant de freins que les technologies passives et quasi-passives permettent de nuancer. Concernant les besoins visés par les dispositifs disponibles, les assistances à l'application d'efforts dans des directions autres que la compensation de poids sont sous-représentés. C'est donc à cette problématique que l'exosquelette développé devra répondre. Le poste de pose garniture de porte est choisi comme cas d'étude, car il est représentatif de la problématique. La validation de tels dispositifs nécessite la mise en place de protocoles complexes et chronophages, dont les outils requièrent une expertise technique. Il apparaît nécessaire de s'assurer que les exosquelettes testés répondent à toutes les attentes avant d'engager toute démarche d'évaluation.

Formalisation du problème de conception d'un exosquelette destiné à l'industrie

Sommaire

3.1	Identification des règles de conception	53
3.1.1	L'impact	53
3.1.1.1	Efforts néfastes	53
3.1.1.2	Compatibilité entre l'exosquelette et le porteur	54
3.1.2	L'appropriation	54
3.1.2.1	Prise en main rapide	55
3.1.2.2	Hygiène	55
3.1.2.3	Ajustement aux morphologies	55
3.1.3	L'utilité	55
3.1.3.1	Perturbations des étapes du process	55
3.1.3.2	Maintenance	56
3.1.4	L'utilisabilité	56
3.1.4.1	Facteurs thermiques	56
3.1.4.2	Encombrement	56
3.1.4.3	Dextérité	57
3.1.4.4	Manipulation des réglages	57
3.1.5	Sécurité	58
3.2	Formalisation du processus de conception	58
3.2.1	Spécifications du besoin	61
3.2.2	Identification de la chaîne de transmission d'efforts	62
3.2.3	Choix du type de fonctionnement	65
3.2.4	Choix du modèle cinématique humain de référence	67
3.2.4.1	Morphologie du coude	67
3.2.4.2	Morphologie de l'épaule	68
3.2.4.3	Simplification du modèle de la ceinture de l'épaule	69
3.2.4.4	Schéma cinématique global du membre supérieur	70
3.2.5	Étude des liaisons d'interaction entre exosquelette et porteur	71
3.2.6	Localisation l'exosquelette sur son porteur	73

3.2.7	Proposition d'une cinématique isostatique	75
3.2.8	Compatibilité morphologique	82
3.2.9	Optimisation du placement des liaisons d'interaction	87
3.2.10	Proposition d'un modèle de raideur de l'exosquelette	87
3.2.10.1	Modèle de Denavit-Hartenberg	87
3.3	Conclusions de la formalisation	88

Malgré l'expansion rapide du marché des assistances physiques type exosquelette, ces technologies restent peu matures. La diversité d'utilisations et d'environnements, associée aux contraintes de conception d'une assistance portative, impose des conceptions dédiées sur-mesure. Les itérations de conception nombreuses représentent un frein à l'utilisation de telles solutions.

Le processus de conception d'un exosquelette doit respecter un cahier des charges strict pour s'assurer de sa pertinence. Trop souvent, des exosquelettes déployés sont finalement mis de côté après un certain temps à cause de contraintes d'utilisation rédhibitoires pour certains utilisateurs. Pour éviter cela et prendre en compte le caractère subjectif de ce type d'assistance, de nombreuses itérations sont généralement nécessaires au cours du développement. Les ressentis et impressions sont variables d'une personne à l'autre, à quoi s'ajoutent les contraintes de conception liées à l'environnement et à l'utilisation. Pour chaque nouvelle version, des tests de validation complexes et chronophages sont nécessaires. De nouveaux moyens de mesure et protocoles améliorent l'efficacité de ces tests, mais des remontées de points bloquants récurrents sont observées sur de nombreux exosquelettes.

Nous proposons de formaliser le processus permettant d'obtenir un premier concept d'exosquelette industriel pertinent, partant de la définition du besoin jusqu'au prototypage. Dans un premier temps, des règles de conceptions sont identifiées et formulées. Puis, les étapes clés de la conception d'un exosquelette sont formalisées et les règles et contraintes de conception leurs sont associées.

3.1 Identification des règles de conception

La caractérisation de la pertinence d'un exosquelette est évaluée selon cinq critères : l'impact, l'appropriation, l'utilité, l'utilisabilité, la sécurité. Pour chacun, des verrous sont identifiés. Ils proviennent d'observations réalisées lors de tests avec des produits du marché ou en cours de développement, notamment lors de réunions de la plateforme d'expérimentation de l'AFNOR "Evaluation des interactions entre homme et exosquelette" auxquelles le Groupe PSA prend part. Certains sont centrés sur l'utilisateur, tandis que d'autres concernent plus directement le déploiement de technologies exosquelette en environnement industriel. Nous proposons de formaliser un certain nombre de ces verrous sous forme de règles de conception, qui seront ensuite intégrées au processus de conception global.

3.1.1 L'impact

Ce critère concerne les effets que le port de l'exosquelette peut avoir sur son porteur.

3.1.1.1 Efforts néfastes

Les exosquelettes étant des dispositifs portés, les efforts échangés ont une influence sur leur porteur. Deux types d'efforts sont à différencier dans cette interaction. Le premier, comprenant les efforts d'assistance, est là pour reprendre une partie ou la totalité de la charge physique que subit le porteur. Quant au second, il concerne les efforts néfastes qui peuvent perturber ou léser le porteur. Les différentes masses du dispositif, la transmission des efforts d'assistance au corps du porteur et la distribution des efforts de réaction de l'assistance sont autant de sources potentielles d'apparition d'efforts néfastes pouvant perturber l'efficacité de l'exosquelette. La transparence est la capacité d'un dispositif à suivre les mouvements de son porteur sans induire d'efforts résistifs. C'est donc un indicateur prépondérant dans l'estimation des efforts néfastes, car il prend en compte la plupart des forces. A noter que dans

certaines domaines, ce sont ces efforts qui s'avèrent utiles. La rééducation par exemple, repose sur le contrôle de la transparence pour freiner les mouvements du porteur et ainsi renforcer la musculature de manière ciblée [149]. Mais concernant les exosquelettes destinés à l'assistance dans l'industrie, ces efforts néfastes sont à minimiser [150].

Un exosquelette léger permettra de réduire le ressenti du poids, mais aussi l'inertie des parties mobiles lors des mouvements. En ajoutant à cela une minimisation des frottements, cela aura un impact direct sur la transparence du dispositif. Il est également préférable que le centre de gravité de l'exosquelette soit le plus proche possible de l'axe verticale de celui du porteur, pour limiter les modifications sur l'équilibre postural. Les contre-efforts, générés par les efforts d'assistance, doivent également être distribués consciemment pour éviter de déplacer ou créer de nouvelles sur-sollicitations sur le corps du porteur.

- $RC_{impact_inertie}$: Minimiser la masse des parties mobiles pour atténuer les effets d'inertie lors des mouvements et le poids ressenti ;
- RC_{impact_cdg} : Définir le centre de gravité de l'exosquelette sur l'axe verticale passant par le centre de gravité du porteur ;
- RC_{impact_distri} : Distribuer les efforts de réaction de l'assistance sur des zones qui ne seront pas perturbées par ceux-ci.

3.1.1.2 Compatibilité entre l'exosquelette et le porteur

La cinématique du corps humain peut être approximée par des modèles plus ou moins plus fidèles, et plus ou moins complexes [151]. Si certaines liaisons peuvent être considérées comme équivalentes à des systèmes à un DDL, d'autres comme l'épaule sont bien plus complexes [6]. Lorsque la structure de l'exosquelette ne prend pas en compte certaines mobilités, les axes de rotation de l'exosquelette et du porteur se désalignent. Cela a pour effet d'entraîner un déplacement de la structure par rapport à son porteur lors de certains mouvements. Schiele et al. [152] aborde les problèmes d'efforts induits lors de ces désaxages. Si des efforts doivent être échangés entre porteur et exosquelette, ils doivent minimiser le déplacement des tissus mous pour éviter les sensations d'inconfort et potentiellement de blessures. Le volume de l'exosquelette autour du porteur est également modifié et peut provoquer une perturbation de la perception de l'encombrement de la structure, avec des risques de collision. Des contacts entre exosquelette et porteur peuvent également apparaître.

Le corps humain possède une forte redondance cinématique. Couplé au fait que les attaches de l'exosquelette sont fixées sur les tissus mous du porteur (peau, muscle), le corps humain est parfois capable de compenser un blocage mécanique de la structure exosquelette en se reconfigurant. Ce problème est à éviter, car cela peut entraîner une modification de l'équilibre postural.

- RC_{impact_dpct} : Minimiser les déplacements relatifs entre la structure de l'exosquelette et son porteur ;
- RC_{impact_tissus} : Minimiser le déplacement des tissus mous au niveau des liaisons d'interaction ;
- RC_{impact_mots} : Garantir la liberté de mouvement du porteur dans son espace de travail.

3.1.2 L'appropriation

Cette catégorie concerne l'appropriation de l'exosquelette par son porteur lorsqu'il est intégré aux outils et équipements usuels du poste.

3.1.2.1 Prise en main rapide

Les opérateurs refusent parfois de continuer à utiliser un exosquelette car ils estiment que la prise en main est trop longue. Le temps d'adaptation et d'apprentissage doit être le plus court possible, pour ne pas décourager ceux-ci lors des premiers essais. L'apprentissage nécessaire pour garantir la bonne utilisation de l'exosquelette doit se limiter à un entretien explicatif d'une heure au maximum.

- RC_{appro_form} : Contenir le temps de formation à une heure maximum.

3.1.2.2 Hygiène

Les exosquelettes sont en contact permanent avec le corps du porteur, générant des problématiques liées à l'hygiène. Les surfaces d'interaction entre porteur et exosquelette doivent pouvoir être personnelles et lavables. L'activité physique soutenue est source de transpiration. Dans le cas où un exosquelette sera utilisé par plusieurs personnes, il faut prévoir un changement rapide des interfaces.

- RC_{appro_int} : Rendre interchangeable les parties de l'exosquelette en contact avec le porteur ;
- RC_{appro_lav} : Permettre aux parties interchangeables d'être lavées.

3.1.2.3 Ajustement aux morphologies

L'adaptabilité entre les morphologies est un critère important pour le déploiement en contexte industriel. La diversité des gabarits doit pouvoir être gérée par des mécanismes de réglage au niveau de la structure, mais il est important d'en minimiser le nombre car ils sont source de complexité d'utilisation et de masse supplémentaire.

En identifiant les réglages nécessaires de manière générale, il est parfois possible de les intégrer directement dans les mobilités de l'exosquelette. Ainsi, L'adaptabilité est automatique et ne nécessite aucune manipulation supplémentaire.

Deux types de variabilité sont observables : la taille et la corpulence. Ici nous n'abordons que les membres supérieurs. Pour la taille, on retrouve les longueurs de bras et avant-bras, l'espacement des épaules, la longueur du tronc. Il existe des rapports de proportion entre la taille du porteur et les longueurs des membres. La corpulence, elle, influence majoritairement le diamètre des bras et avant-bras, l'épaisseur du buste.

- RC_{appro_adapt} : Intégrer des réglages permettant d'adapter l'exosquelette aux différentes morphologies standards.

3.1.3 L'utilité

Cette catégorie concerne l'utilité de l'exosquelette dans le processus de production industriel au regard de l'organisation nécessaire à son utilisation.

3.1.3.1 Perturbations des étapes du process

Le temps de chaque cycle est piloté par la cadence de production des véhicules. Dans le cadre de la production automobile en grande série, le porteur de l'assistance doit réaliser la même tâche toutes les minutes en moyenne pendant une période de deux heures sans arrêt. L'équilibrage des postes étant

très stricte, il est parfois impossible de rajouter des tâches annexes nécessaires à la manipulation de l'exosquelette. L'utilisation de l'assistance doit être automatisée au maximum, car s'ajoutent également les risques de surcharge cognitive à prendre en compte. Avec le compactage des lignes, l'optimisation de l'environnement et le besoin de flexibilité des installations, il faut minimiser les besoins d'équipements en bord de ligne.

- $RC_{utilite_manip}$: Ne pas ajouter de tâche de manipulation de l'exosquelette à celles du poste ;
- $RC_{utilite_auto}$: Garantir une autonomie supérieure à la durée d'une rotation de poste égale à deux heures ;
- $RC_{utilite_instal}$: Ne doit pas nécessiter d'installation supplémentaire sur la ligne de production.

3.1.3.2 Maintenance

Si la maintenance des exosquelettes peut être prise en charge par le fabricant, il est préférable de fournir aux utilisateurs les moyens de réaliser celle-ci seuls sans nécessiter de compétence particulière. Pour faciliter cela, les pièces d'usure doivent être identifiées et facilement interchangeables. Éviter la diversité de pièces permettra également de simplifier leur remplacement.

- $RC_{utilite_maint}$: Générer les pièces pour réduire leur diversité et faciliter la maintenance.

3.1.4 L'utilisabilité

Cette catégorie concerne la facilité d'utilisation de l'exosquelette pour rendre le service attendu.

3.1.4.1 Facteurs thermiques

Les exosquelettes étant des dispositifs directement attachés sur le corps du porteur, des problèmes thermiques peuvent apparaître. Pour assurer un maintien correct, un serrage parfois important est nécessaire au niveau des attaches qui transmettent des efforts. Pour garantir un confort suffisant en limitant la pression de contact, ces attaches peuvent être molletonnées et larges. Cela a pour conséquence d'isoler thermiquement la peau du porteur, et favoriser la transpiration. Il suffit parfois de plaquer un vêtement sur le corps pour que ce phénomène apparaisse, en empêchant la circulation d'air sous un tee-shirt par exemple. La sensation de chaleur peut devenir inconfortable dans des environnements chauds, ou lors d'efforts physiques. Des problèmes d'hygiène apparaissent également avec la sueur.

Il advient que pour limiter ce phénomène, il faut réduire au maximum le nombre d'attaches ainsi que leur surface de contact entre l'exosquelette et le porteur. Des matières aérées sont préférables, pour limiter le phénomène de transpiration.

- $RC_{utilisab_att}$: Limiter le nombre d'attaches et leur surface de contact sur le corps ;
- $RC_{utilisab_trans}$: Éviter la transpiration au niveau des surfaces de contact.

3.1.4.2 Encombrement

Les stations de travail sont parfois exiguës, et de nombreux équipements et outils de travail y sont disposés. Les risques de collision sont importants, et le port d'un exosquelette est aggravant. Le volume

corporel perçu par l'opérateur se trouve modifié, et les risques de s'accrocher ou toucher des zones sensibles peuvent être importants (outils, voiture, etc).

Il est nécessaire de réduire au maximum l'encombrement de l'exosquelette. Mais par définition, cet encombrement ne peut être nul. Pour améliorer la perception volumique du porteur, le choix doit se tourner vers des structures qui épousent ses membres de manière régulière et homogène. On privilégiera une cinématique proche du corps, qui assure une meilleure familiarisation et adaptation à l'exosquelette.

- $RC_{utilisab_homo}$: Répartir de manière homogène le volume de l'exosquelette autour de chaque segment du corps humain ;
- $RC_{utilisab_cons}$: Conserver le même volume de l'exosquelette autour de son porteur indépendamment de la position articulaire ;
- $RC_{utilisab_vol}$: Minimiser le volume d'encombrement de l'exosquelette porté.

3.1.4.3 Dextérité

Les opérateurs sont qualifiés et possèdent un savoir-faire important pour assurer les cadences imposées. L'exosquelette ne doit donc pas perturber leur dextérité, sous peine de rallonger le temps de réalisation de certaines tâches et impacter la production. Pour garantir la qualité de son travail, l'opérateur doit garder le contrôle sur les efforts générés par l'exosquelette. Une assistance à 100% de la charge n'est pas forcément la solution, car il y a un risque de perte de sensations d'effort. Ce pourcentage optimal étant subjectif, il doit être possible de l'ajuster en fonction de l'utilisateur.

- $RC_{utilisab_dext}$: Ne pas dégrader la dextérité du porteur ;
- $RC_{utilisab_vit}$: Ne pas réduire la vitesse d'exécution des mouvements ;
- $RC_{utilisab_puiss}$: Ajuster la puissance de l'assistance selon les préférences de son porteur.

3.1.4.4 Manipulation des réglages

Les opérations de mise en place et de dépose de l'exosquelette seront réalisées lors des temps de pause du porteur. Il faut les limiter à 30 sec pour ne pas réduire de manière trop drastique les temps de repos, et risquer d'avoir un refus de la part de l'opérateur d'amputer sur son temps libre pour s'équiper.

En limitant le nombre de liaisons avec le porteur, on réduit également le temps de mise en place et de fixation. Si des réglages sont nécessaires, ils seront rapides et intuitifs pour ne pas nécessiter une assistance extérieure ni dépasser le temps de mise en place. Si une interface est nécessaire pour les réglages ou l'utilisation, il faut prendre en compte le fait que la charge cognitive des opérateurs est déjà monopolisée par les tâches du poste.

- $RC_{utilisab_equi}$: Equiper l'exosquelette ne doit pas prendre plus de 30 sec lorsqu'il est déjà réglé ;
 $RC_{utilisab_regl}$: Ajuster l'exosquelette à la morphologie du porteur ne doit pas prendre plus de 30 sec ;
- $RC_{utilisab_des}$: Déséquiper l'exosquelette et le ranger dans son espace de stockage ne doit pas prendre plus de 30 sec.
- $RC_{utilisab_auto}$: Autonomiser le porteur pour toutes les manipulations liées à l'utilisation de l'exosquelette.

3.1.5 Sécurité

Cette catégorie concerne les risques de sécurité liés au port de l'exosquelette en conditions nominales ou dégradées. Les exosquelettes sont en contact permanent avec le porteur, leur sécurité doit être garantie. Dans le cas d'une défaillance technique de l'exosquelette ou d'une urgence, la structure ne doit pas mettre en péril son porteur. Deux modes d'arrêt sont possibles. Dans un premier cas, la structure de l'exosquelette se bloque. Le porteur doit alors pouvoir enlever la structure rapidement, pour des raisons de sécurité mais aussi pour ne pas perturber la production. Dans un second cas, l'exosquelette peut intégrer un mode dégradé où la structure est libre et ne gêne pas l'opérateur dans ses mouvements le temps qu'il puisse se déséquiper.

- RC_{secu_mode} : Intégrer un mode de fonctionnement dégradé sécurisé en cas de défaillance de fonctionnement ;
- RC_{secu_urg} : Permettre au porteur d'enlever l'exosquelette rapidement en cas de défaillance ou d'urgence.

3.2 Formalisation du processus de conception

La complexité des exosquelettes et l'attrait récent pour ce type de technologies mettent en avant l'immaturité de la plupart des dispositifs disponibles. Les utilisateurs ne sont pas nécessairement conscients des apports de tels dispositifs. En conséquence, ils se reposent sur les itérations de développement pour affiner leurs besoins et attentes. Pour accélérer le développement et minimiser les itérations de conception nécessaires à l'obtention d'un prototype fonctionnel, nous proposons ici de formaliser les différentes étapes de conception. Des méthodes de formalisation centrées sur les règles de conception [153] sont très bien adaptées pour les systèmes complexes dont le cahier des charges est obtenu de manière objective. Mais dans le cadre des exosquelettes, il est difficile d'exprimer toutes les solutions possibles pour un même verrou technologique et il faut parfois convenir de compromis. C'est sur cet axe que porte la formalisation que nous proposons. L'objectif est de généraliser ce cheminement, pour systématiser la proposition d'un concept pertinent à partir d'un besoin issu de l'industrie. A chaque étape du processus de conception, nous détaillons les différents axes technologiques possibles ainsi que les outils permettant de sélectionner la meilleure solution pour le cas d'application choisi. Les règles de conception décrites précédemment sont ensuite intégrées pour être prises en compte afin de valider ou non le passage à l'étape suivante. Une vue d'ensemble est proposée Figure 3.1

Pour illustrer la méthodologie, nous l'appliquons au fur et à mesure au cas d'application sélectionné précédemment.

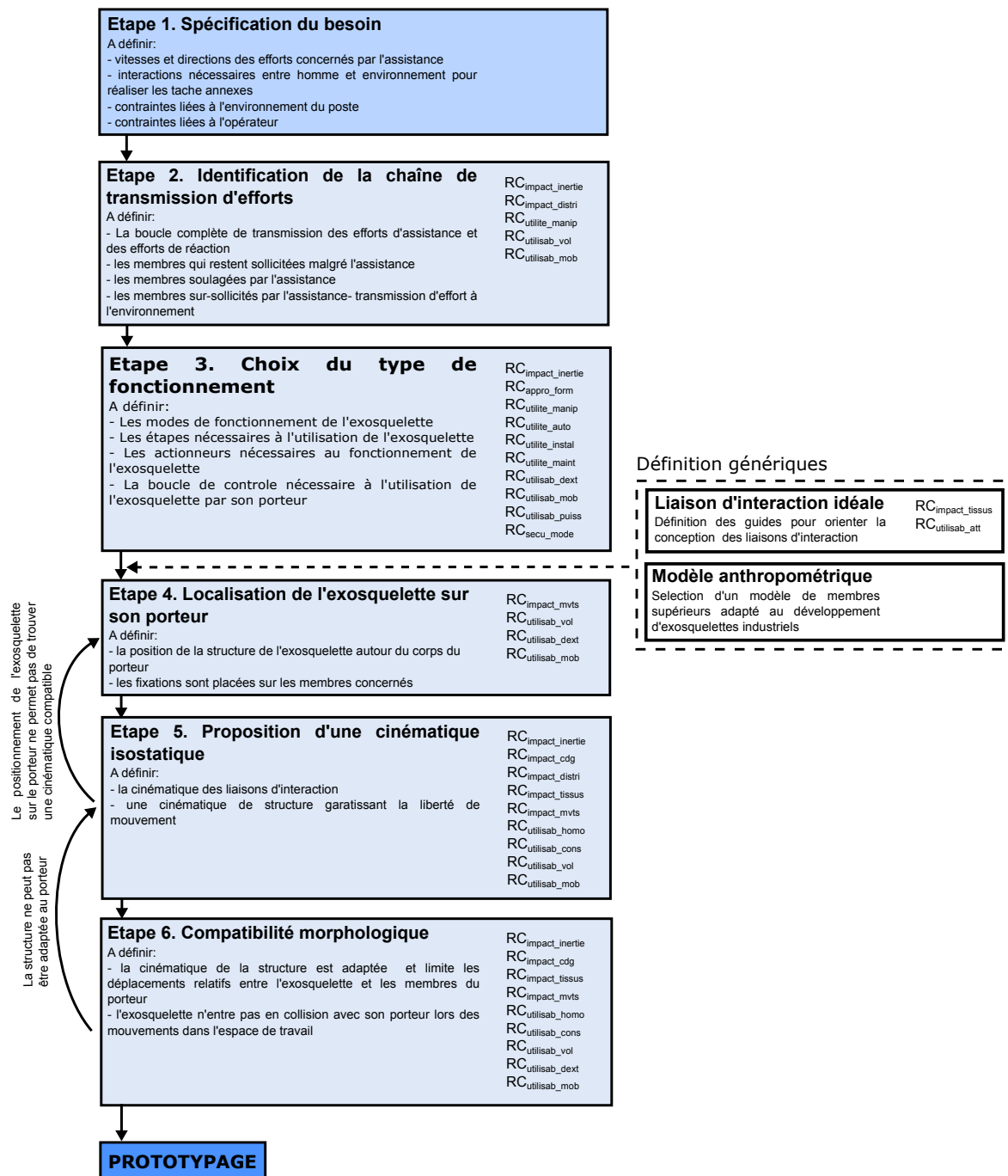


FIGURE 3.1 – Formalisation des étapes de proposition d'un concept d'exosquelette industriel

TABLE 3.1 – Liste des règles de conception

	Dénomination	Détail
Impact	$RC_{impact_inertie}$	Minimiser la masse des parties mobiles pour atténuer les effets d'inertie lors des mouvements et le poids ressenti
	RC_{impact_cdg}	Définir le centre de gravité de l'exosquelette sur la verticale passant par le centre de gravité du porteur
	RC_{impact_distri}	Distribuer les efforts de réaction de l'assistance sur des zones qui ne seront pas perturbées par ceux-ci
	RC_{impact_dpct}	Minimiser les déplacements relatifs entre la structure de l'exosquelette et son porteur
	RC_{impact_tissus}	Minimiser le déplacement des tissus mous au niveau des liaisons d'interaction
	RC_{impact_mots}	Garantir la liberté de mouvement du porteur dans son espace de travail
Appropriation	RC_{appro_form}	Contenir le temps de formation à une heure maximum
	RC_{appro_int}	Rendre interchangeable les parties de l'exosquelette en contact avec le porteur
	RC_{appro_lav}	Permettre aux parties interchangeables d'être lavées
	RC_{appro_adapt}	Intégrer des réglages permettant d'adapter l'exosquelette aux différentes morphologies standards
Utilité	$RC_{utilite_manip}$	Ne pas ajouter de tâche de manipulation de l'exosquelette à celles du poste
	$RC_{utilite_auto}$	Garantir une autonomie supérieure à la durée d'une rotation de poste égale à deux heures
	$RC_{utilite_instal}$	Ne doit pas nécessiter d'installation supplémentaire sur la ligne de production
	$RC_{utilite_maint}$	Générer les pièces pour réduire leur diversité et faciliter la maintenance
Utilisabilité	$RC_{utilisab_att}$	Limiter le nombre d'attaches et leur surface sur le corps
	$RC_{utilisab_trans}$	Eviter la transpiration au niveau des surfaces de contact
	$RC_{utilisab_homo}$	Répartir de manière homogène le volume de l'exosquelette autour de chaque segment du corps humain
	$RC_{utilisab_cons}$	Conserver le même volume de l'exosquelette autour de son porteur indépendamment de la position articulaire
	$RC_{utilisab_vol}$	Minimiser le volume d'encombrement de l'exosquelette porté
	$RC_{utilisab_dext}$	Ne pas dégrader la dextérité du porteur
	$RC_{utilisab_mob}$	Ne pas dégrader la mobilité du porteur dans son environnement de poste
	$RC_{utilisab_puiss}$	Ajuster la puissance de l'assistance selon les préférences de son porteur
	$RC_{utilisab_equi}$	Equiper l'exosquelette ne doit pas prendre plus de 30 sec lorsqu'il est déjà réglé
	$RC_{utilisab_regl}$	Ajuster l'exosquelette à la morphologie du porteur ne doit pas prendre plus de 30 sec
Sécurité	RC_{secur_mode}	Déséquiper l'exosquelette et le ranger dans son espace de stockage ne doit pas prendre plus de 30 sec
	RC_{secur_urg}	Autonomiser le porteur pour toutes les manipulations liées à l'utilisation de l'exosquelette
	RC_{secur_mode}	Intégrer un mode de fonctionnement dégradé sécurisé en cas de défaillance de fonctionnement
	RC_{secur_urg}	Permettre au porteur d'enlever l'exosquelette rapidement en cas de défaillance ou d'urgence

3.2.1 Spécifications du besoin

La première étape consiste à bien définir les besoins. L'environnement industriel est de manière générale très contraint, mais même si certaines règles à respecter sont communes à tous les postes de travail, les tâches réalisées impliquent parfois des contraintes spécifiques.

La dextérité des opérateurs est souvent ce qui justifie leur poste. Elle est nécessaire au respect de la qualité et des temps de production, et ne doit en aucun cas pâtir du port d'un dispositif d'assistance.

La vitesse de déplacement est critique pour garantir le respect des temps de production. Elle est variable selon les opérateurs et selon les membres, il faut donc partir du principe que la vitesse maximale de chaque membre doit pouvoir être assurée lors du port de l'assistance.

En plus de la vitesse, l'amplitude articulaire doit être suffisante pour que le porteur puisse atteindre tout l'espace de travail. Pour cela, le référentiel est basé sur l'espace de travail préconisé par les standards ergonomiques (NF EN 1005) présentés Figure 3.2, et interdit tout mouvement en zone non préconisée.

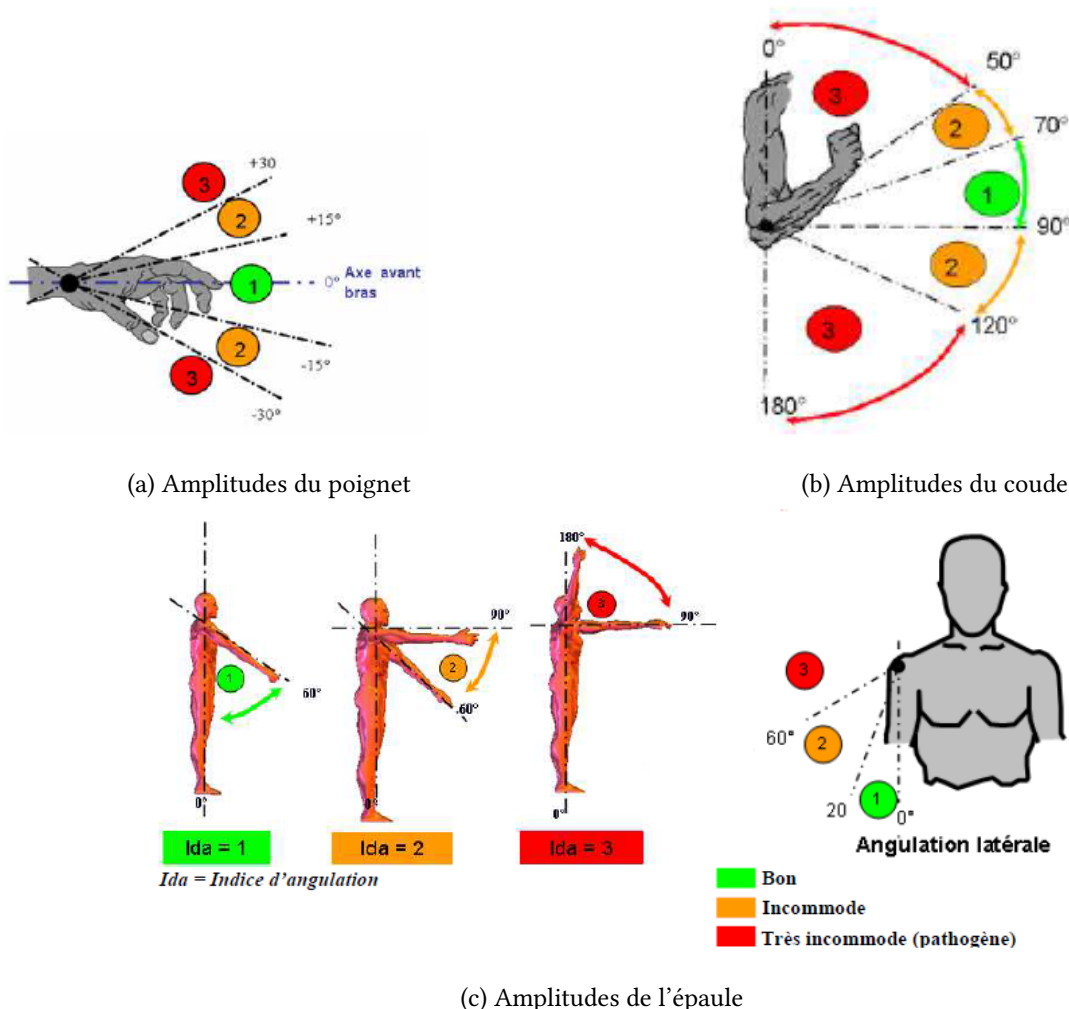


FIGURE 3.2 – Guide interne pour les amplitudes articulaires, basé sur la NF EN 1005. En vert sont les amplitudes conseillées, en jaune les amplitudes à éviter, et en rouge les amplitudes à proscrire.

Application au cas d'étude

L'environnement de travail de l'opérateur concerné par le poste sélectionné est standard pour le mé-

tier montage. Il travaille en atelier, sur la ligne de production. L'environnement est considéré comme bruyant, le port de bouchons d'oreille est obligatoire. Il est équipé de la tenue standard, composée de vêtements PSA sans boutons, de chaussures de sécurité, casquette de protection et gants. La cadence impose des opérations de 40 sec pour les portes les plus complexes, avec un total de 354 portes/jour. L'assistance est identifiée pour réaliser la tâche de clippage de la garniture de porte. L'effort appliqué en poussée est de 120 N, les bras vers le bas et les avant-bras horizontaux (coude à 90°). Les opérateurs ont ressenti lors de l'application de l'effort une contraction statique des muscles de l'avant-bras, blocage poignet et effort du bout des doigts de 6 à 11 sec par cycle.

Le poste comprend de nombreuses tâches annexes, telles que la manipulation d'une visseuse, de différentes pièces d'assemblage, l'utilisation d'une roulette et le déplacement d'une servante.

L'opérateur doit donc garder toute la dextérité au niveau de ses mains, elles doivent rester libres où du moins ne pas être entravées lors des manipulations. De plus, l'opérateur se déplace du kamban, où sont stockées les pièces, à la servante et à la ligne où circulent les portes en mouvement continue. Il a besoin d'une grande mobilité hors assistance, mais également lors de l'application de l'effort d'assistance car la porte reste en mouvement.

3.2.2 Identification de la chaîne de transmission d'efforts

La chaîne de transmission d'efforts représente la liste ordonnée de corps solides supportant les efforts d'assistance et les efforts de réaction associés. Une représentation possible de ces interactions est décrite Figure 3.3, où toutes les configurations sont représentées. Nous identifions six sous-ensembles distincts :

- L'environnement, qui correspond au mobile ou objet sur lequel le porteur applique initialement son effort (visseuse, caisse, chariot ;
- Le bâti, représentant le sol où tout autre équipement fixe par rapport au sol ;
- Les parties du corps en contact avec l'environnement, que le porteur initialement sollicite pour appliquer les efforts (les mains en général) ;
- Les parties du corps sur-sollicitées, qui sont identifiées comme surchargées et potentiellement sources de maladies professionnelles ;
- Les parties du corps robustes, capables de reprendre les contre-efforts dans des situations de la vie quotidienne (cuisses, hanches, ...);
- L'exosquelette, représentant la structure d'assistance capable de transmettre et/ou générer des efforts.

La configuration Figure 3.3 est largement représentée dans le secteur des exosquelettes industriels, comme le *Skelex* ou le *Corfor*. Le porteur n'a pas besoin d'adapter son travail à l'exosquelette, car celui-ci ne cible qu'une portion du corps qui est sur-sollicitée. Cependant, des concentrations de contraintes peuvent apparaître au niveau des parties en contact avec l'environnement ou sur les parties du corps où sont dissipées les contre-efforts

Pour raccourcir la chaîne cinématique et simplifier la structure, de nombreux exosquelettes transmettent les contre-efforts d'assistance directement à d'autres parties du corps (Fig.3.3 col.1). Il faut s'assurer que ces zones sont suffisamment robustes pour ne pas être perturbées par ces efforts supplémentaires. Selon les efforts et l'emplacement, on retrouve les cuisses, les hanches ou le buste. Ils sont tous composés de muscles posturaux puissants, assurant une résistance suffisante à des sollicitations

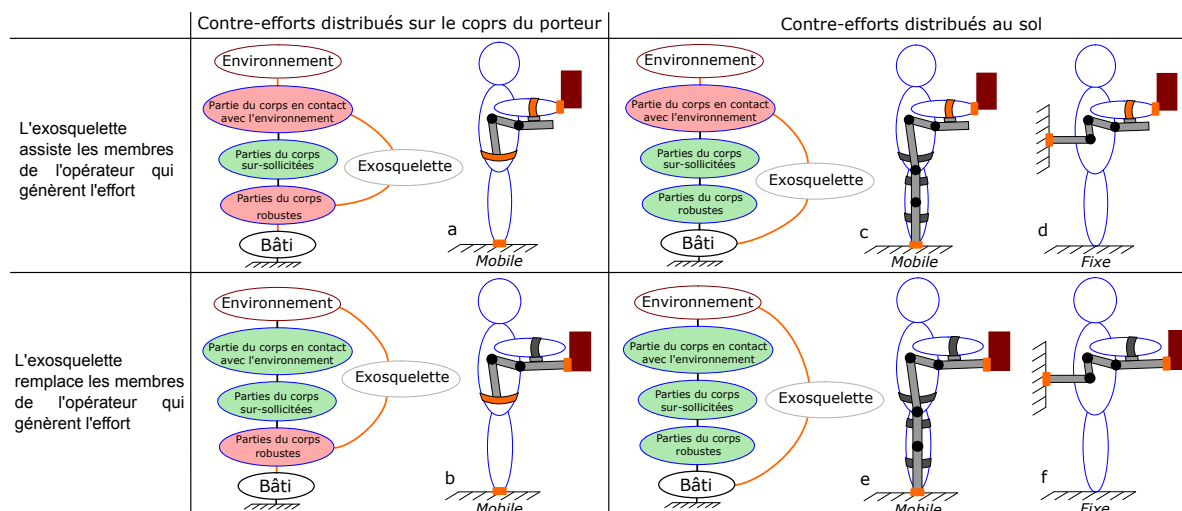


FIGURE 3.3 – Représentation des chaînes d'efforts possibles lors de l'utilisation d'un exosquelette. Graphes de connections : Les bulles colorées en rouge représentent les zones du corps sous charge. En vert sont les zones du corps soulagées par l'assistance. Les liaisons oranges symbolisent le chemin parcouru par les forces d'assistance et de réaction. Schémas : Les attaches de maintien en position de l'exosquelette sur le corps du porteur sont représentées en gris. Toutes les interfaces à travers lesquelles des efforts transitent sont colorées en orange.

externes. Des risques de modification de l'équilibre postural et de la fatigue musculaire peuvent apparaître sur le long terme, et il est difficile de les prévoir avec exactitude. Il convient donc de limiter autant que possible ces risques de sur-sollicitations.

Transmettre les efforts directement à l'environnement permet de décharger le porteur de toute contre réaction générée par l'assistance, mais aussi de limiter le ressenti du poids du dispositif porté (Fig.3.3 col.2). Si c'est le sol, cela implique de prévoir des jambes au systèmes même si l'assistance est située au niveau des membres supérieurs uniquement. Ce cas là est adapté pour des efforts dont la composante principale est verticale. Pour des efforts tangents au sol, il faut prévoir des moyens spécifiques pour assurer une bonne accroche des semelles. Il est également possible de se rattacher à l'environnement directement, dans ce cas là il faut prévoir une attache spécifique sur un support capable de reprendre les efforts. Il faut cependant prendre en compte les manipulations et le temps supplémentaires si le porteur doit réaliser les étapes d'accroche et décrochage.

Dans certains cas, il est nécessaire de garder une interaction manuelle avec l'environnement (Fig.3.3 ligne.1). Ces configurations permettent de conserver un niveau de dextérité élevé, mais sont aussi potentiellement la source de concentration de contraintes. Pour palier à cela, il est possible de transférer la tâche de manipulation directement à l'exosquelette, ce qui libère la charge des parties du corps normalement en contact avec l'environnement (Fig.3.3 ligne.2). Il faut cependant prendre en compte d'éventuels manipulations supplémentaires nécessaires pour l'interfaçage de l'environnement avec l'exosquelette.

Une chaîne cinématique plus longue implique plus de liaisons et plus de parties mobiles. La commande et la réalisation de la structure sont plus complexes, dégradent la maniabilité et augmentent l'encombrement. Il faut préférer une chaîne d'effort courte, mais qui transmet les contre-réactions sur des zones capables de reprendre les efforts sans être perturbées. La configuration Fig.3.3a se destine à des assistances d'efforts faibles à modérés pour limiter les risques de déplacement de sollicitations, mais avec un besoin important de garder de la dextérité. La configuration Fig.3.3b est également préférable

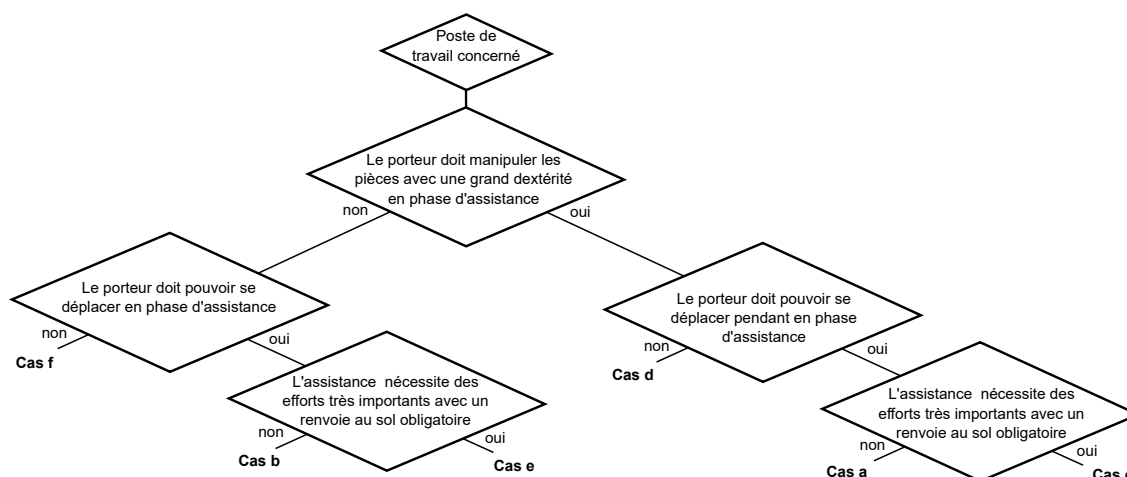


FIGURE 3.4 – Algorithme de sélection de la chaîne de transmission d'effort

pour des efforts faibles à modérés, mais permet dans le cas de manipulation basiques de soulager également les parties du corps en contact avec l'environnement. Les configurations Fig.3.3c et Fig.3.3d se destinent à des assistances fortes pour justifier la complexité et le poids important qui en résulte. Mais les risques de sur-sollicitations des parties du corps en contact avec l'environnement sont majeurs et limitantes dans les efforts à assister. Les configurations Fig.3.3e et Fig.3.3f se destinent également à des assistances fortes, et le fait que les manipulations soient prises en charge par l'exosquelette permet de proposer des assistances sans limite de puissance. Le porteur n'a ici qu'un rôle de positionnement et guidage.

Pour illustrer le cheminement nécessaire à la sélection de le chaîne de transmission d'effort pour un cas d'application défini, nous proposons l'algorithme présenté Fig. 3.4.

Application au cas d'étude

Dans le cadre du cas d'étude, l'effort identifié est réalisé au niveau des mains. Il est horizontal, et en poussée. Les membres sur-sollicités ont été identifiés par les opérateurs qui remontent des douleurs persistantes au niveau des poignets, bras et épaules.

La première étape est de définir si l'effort sera appliqué par les mains de l'opérateur ou si la structure de l'exosquelette le fera directement. Dans notre cas, aucune manipulation spécifique n'est nécessaire lors de l'application de l'effort d'assistance. Un appui direct de l'exosquelette sur la garniture de porte garantira la transmission de l'effort d'assistance tout en soulageant les mains de l'opérateur.

Lors de la phase d'assistance, l'opérateur, doit constamment se déplacer pour suivre la porte fixée sur le convoyeur. Un renvoi des contre-efforts sur un support extérieur à la ligne n'est donc pas envisageable. Comme présenté précédemment, une dissipation des contre-efforts au bâti est à préférer pour limiter les risques de déplacement des sollicitations (Fig. 3.3-col 2). Cependant, l'effort est ici horizontal. Donc même en considérant un transfert au sol, il reste un risque important de glissement. De plus, l'intensité de l'effort à assister et la distance avec le sol font que le contre-effort résultant au niveau des pieds sont extrêmement élevés.

Une solution possible permettant de se limiter aux membres supérieurs est en transmettant les contre-efforts à l'environnement. Elle nécessite un point de fixation supplémentaire, avec un support à hauteur des membres supérieurs, sur lequel l'exosquelette peut venir s'accrocher et distribuer les

contre-efforts de l'assistance. Rajouter une étape ainsi qu'un support sur la ligne sont des limites à cette solution.

Pour palier le problème d'accroche supplémentaire, une approche étudiée consiste à utiliser un bras de l'exosquelette pour appliquer l'effort tandis que l'autre servira d'accroche sur le bâti pour transmettre les contre-efforts. Dans ce cas, le fonctionnement se rapproche du geste naturel qui consiste à prendre appui sur un bras pour pousser avec l'autre. Mais même si l'étape nécessaire à l'accroche sur le bâti est plus naturelle car réalisée avec un bras directement, elle nécessite toujours un temps dédié ainsi qu'un système de fixation supplémentaire sur les équipement de la ligne.

En distribuant les contre-efforts sur une autre partie du corps du porteur directement, on supprime toute étape d'accroche sur le bâti pour transmettre les contre-efforts. Mais en contrepartie, on augmente fortement les risques de déplacement des sollicitations.

3.2.3 Choix du type de fonctionnement

A partir du choix de la chaîne d'efforts, il est possible de faire une première estimation des forces que la structure doit être capable de transmettre ou générer. A partir de ces estimations, et couplées aux besoins du cas d'usage, il est alors possible de déterminer les types d'actionnement possibles.

Il en existe trois types. Les systèmes passifs ont le gros avantage de proposer des mécanismes simples, et nécessitant peu d'entretien. Leur faible poids leur procure un avantage important en terme de mobilité. Mais ils sont également rapidement limités en force, et leur réglage nécessite une intervention spécifique. Les ressorts sont largement utilisés, et si leur précontrainte peut être ajustée, il faut changer de ressort si l'on veut une raideur différente.

Les systèmes quasi-passifs ont une faible consommation, et peuvent transmettre des couples importants. Mais leur masse est plus élevée que les systèmes passifs, et nécessitent une architecture de commande.

Les systèmes actifs ont l'avantage d'être versatiles, mais c'est au détriment du poids et de la complexité de commande. L'utilisation de capteurs spécifiques permettent de capter l'information en temps réel. Les EMGs détectent l'activité musculaire, mais sont encore peu adaptés à une utilisation quotidienne. Des capteurs d'effort placés aux bons endroits peuvent alors détecter le besoin en assistance. Il reste encore difficile d'atteindre une transparence suffisante pour réaliser les tâches rapides et de précision.

Application au cas d'étude

La chaîne d'effort propose repose sur la transmission d'effort entre le buste et les avant-bras pour soulager les membres supérieurs. Ainsi, lors de l'application d'effort au niveau des mains du porteur, la contre réaction doit être dissipée sur le torse. Plusieurs approches sont alors possibles pour générer la force d'assistance.

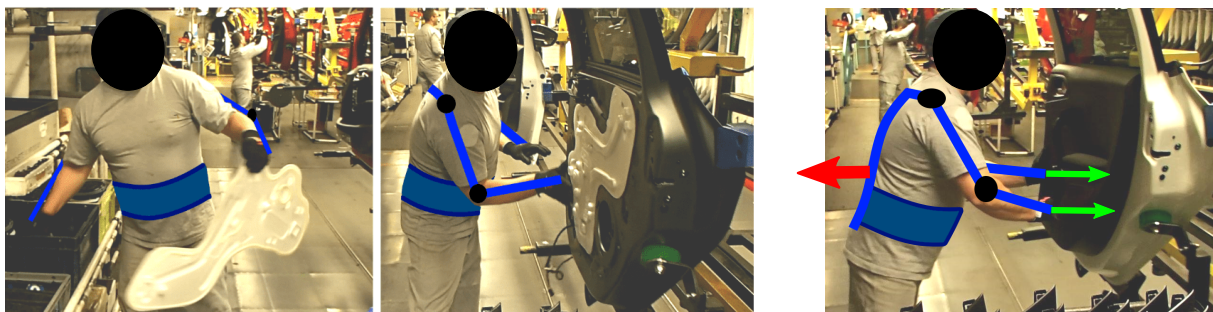
La première approche consiste équiper l'exosquelette de liaisons actives. La structure produit l'effort d'assistance équivalent à une force de 120 N au niveau des avant-bras. Les efforts de réaction sont ensuite transmis au buste, stabilisé par les jambes du porteur. En supposant une cinématique proche du corps humain, les couples de liaisons sont de plusieurs dizaines de N.m. Les moteurs rotatifs électriques ou hydrauliques sont les actionneurs les plus répandus pour générer des efforts importants. Des actionneurs capables de générer de tels efforts représentent plusieurs kilos chacun. En ce qui concerne les moteurs électriques, un moteur tournant à haute vitesse et avec un rapport de réduction très im-

portant permettrait de développer un couple suffisant. Réduire le rapport de réduction pour gagner du poids implique d'augmenter la taille du moteur ainsi que la consommation instantanée. Mais le poids d'un seul moteur reste supérieur au kilo. Le poids important des actionneurs, de l'électronique ainsi que la source d'énergie nécessaire représentent des freins majeurs à leur utilisation dans un contexte de portativité.

Une autre approche consiste à limiter le nombre d'actionneurs à un seul, générant l'assistance. La structure est alors uniquement en charge de se rigidifier pour transmettre les efforts de réaction au buste. Un actionneur linéaire électrique ou pneumatique délivrant l'effort de 120 N sera placé sur l'avant-bras. La structure, composée de liaison quasi-passives, sera capable de se rigidifier sur commande pour transmettre les efforts de réaction de l'actionneur au torse stabilisé par les jambes.

Une dernière approche consiste à imiter le comportement humain lors de l'application de tels efforts. Si la masse du buste est suffisante, son poids permet de générer l'effort nécessaire à l'assistance. Dans ce cas, le porteur de l'exosquelette sera en charge de positionner la structure avec le buste en appui. En rigidifiant ensuite la structure, l'effort sera directement transmis des avant-bras au buste. Seules des liaisons quasi-passives sont nécessaires, mais le fonctionnement reste très dépendant de la masse du buste du porteur qui doit être suffisante pour appliquer l'effort nécessaire. Pour palier à ce dernier problème, il faut ajouter artificiellement de la masse au buste. Le comportement habituel dans ce type de problématique est de prendre de l'élan, puis rigidifier ensuite les membres supérieurs pour transformer l'inertie en force de poussée. L'inertie du buste peut alors générer un effort bien plus important, proportionnel à la masse au carré de la vitesse.

C'est finalement cette dernière approche qui est retenue, elle est présentée Fig. 3.5. Elle ne nécessite que des actionneurs quasi-passifs, encore peut représentés. Les potentiels verrous technologiques concernant l'actionnement et la structure devront être levés.



En dehors des phases d'assistance à l'opération de clipsage, l'exosquelette ne perturbera pas les mouvements de l'opérateur. Il sera équipé rapidement à la prise du poste et restera équipé tant qu'une telle assistance est nécessaire.

Lorsque l'opérateur doit réaliser l'opération nécessitant l'assistance, l'exosquelette détecte l'intention et active l'effort nécessaire.

FIGURE 3.5 – Représentation du fonctionnement du concept d'exosquelette proposé. En vert sont les efforts d'assistance, ou rouge les efforts de réaction

3.2.4 Choix du modèle cinématique humain de référence

Les exosquelettes sont des dispositifs directement portés par l'opérateur. Afin de garantir une liberté totale de mouvement une fois que l'opérateur est couplé à l'exosquelette, il faut pour cela estimer les mobilités des membres humains et connaître leur cinématique. Mais il est aujourd'hui toujours difficile de décrire exhaustivement la cinématique du corps humain. Les liaisons qui le composent sont constituées de cartilages, tendons, muscles, ce qui les rend variées et complexes [154]. A cela s'ajoutent les variations anthropométriques entre les individus qui empêchent de définir un modèle universel. Il est également difficile d'observer précisément les mouvements sans utiliser des moyens lourds et invasifs à cause des tissus mous qui recouvrent le corps humain.

Il existe plusieurs approches pour prédire le mouvement du complexe de l'épaule. La méthode prédictive est calculée à partir de marqueurs placés sur le corps, qui sont ensuite traités par optimisation pour remonter à la cinématique réelle [155, 156, 157, 158]. Mais cette méthode doit prendre en compte les mouvements des tissus mous, et elle généralise le comportement de toutes les épaules sans prendre en compte les spécificités anatomiques. Une autre approche consiste à identifier les centres des liaisons qui constituent l'épaule à partir de mouvements de calibration [159]. L'objectif final serait d'approcher cet ensemble à un mécanisme pour pouvoir réaliser les différents calculs nécessaires [160, 161, 162, 163, 9].

Dans le domaine de la réhabilitation médicale, il est souvent primordial d'avoir une connaissance fine des mouvements biomécaniques internes générés par le port et l'assistance de l'exosquelette. Pour la rééducation, les sollicitations tendineuses et musculaires doivent être suivies avec précision pour ne pas aggraver l'état du patient et contrôler le bon déroulement. Dans un contexte industriel, le port de l'exosquelette ne doit pas perturber la stabilité cinématique de l'opérateur également. Mais il n'est pas nécessaire d'intégrer dans la conception un tel degré de précision.

Il est important pour la conception et la suite de l'étude, de définir un modèle du membre supérieur. Le choix devra être cohérent avec les attentes en termes de fidélité et précision, pour permettre la conception d'un mécanisme valide biomécaniquement et qui réponde aux différentes contraintes imposées.

3.2.4.1 Morphologie du coude

Il est constitué de trois os distincts, l'humérus le radius et le cubitus (Fig. 3.6a). L'articulation assure deux mouvements, la flexion/extension ainsi que la pronation/supination de l'avant-bras (Fig. 3.6b).

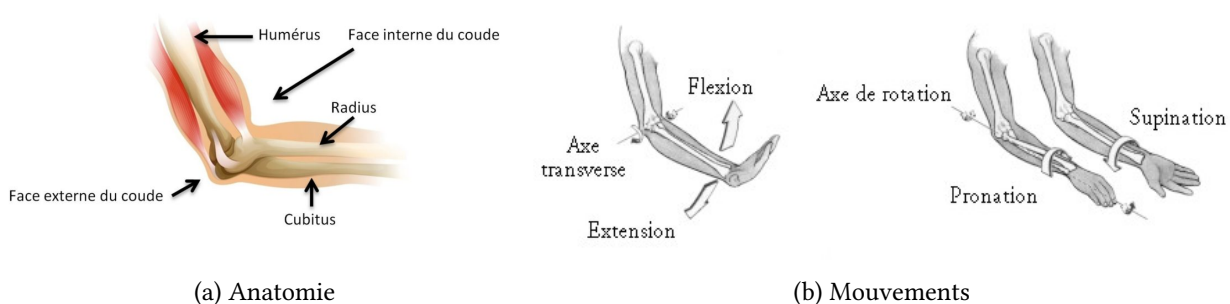


FIGURE 3.6 – La liaison du coude [5]

Même si la liaison du coude pour le mouvement de flexion et extension semble être une simple pivot, en réalité elle est plus complexe. En prenant comme référentiel l'humérus, l'axe de rotation os-

cille [164, 165]. Mais il ne s'agit que de quelques degrés, et l'assimiler à une pivot reste acceptable. Concernant la pronation et la supination de l'avant-bras, il s'agit plus en réalité d'une liaison hélicoïdale. Mais la translation étant très faible, elle est négligeable à notre niveau d'étude car compensée par les déplacements des tissus mous. La rotation de l'avant-bras autour de son axe longitudinal est souvent considérée comme une rotation du poignet. Mais cette rotation impacte les tissus mous au niveau de l'avant-bras en les faisant tourner. Nous considérons donc cette rotation comme opérant au niveau du coude pour que ces déplacements de tissus mous soient pris en compte.

3.2.4.2 Morphologie de l'épaule

Pour assurer les mobilités (Fig. 3.7a) et les amplitudes de mouvements, le mécanisme de l'épaule humaine est composé principalement de trois os : l'humerus, l'omoplate et la clavicule. Ces trois os sont liés ensemble par un ensemble de 4 liaisons :

- Sternoclaviculaire (SC), entre le sternum et la clavicule ;
- Acromioclaviculaire (AC), entre l'omoplate et la clavicule ;
- Glenohumérale (GH), entre l'omoplate et l'humérus ;
- Scapulothoracique (ST), entre l'omoplate et le thorax.

Les trois premières liaisons SC, AC et ST (Fig. 3.7b) constituent la ceinture de l'épaule, tandis que la GH relie le bras à cet ensemble. La liaison GH assure la majeure partie des amplitudes de mouvement. Mais la cinématique de la ceinture permet de déplacer et orienter cette liaison GH pour augmenter la mobilité de l'épaule et ainsi atteindre les amplitudes maximales. La conséquence principale est que les centres de rotation ne sont pas fixes.

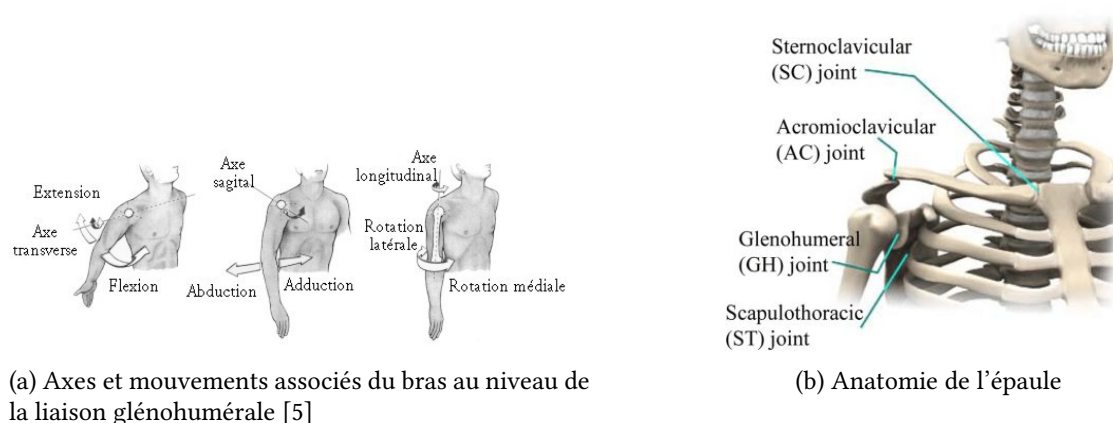


FIGURE 3.7 – Complexe de l'épaule

La modélisation fait débat, et la conséquence est que de nombreux modèles sont développés, avec chacun leurs spécificités [11] (Fig. 3.8).

Si la représentation de la liaison GH est le plus souvent modélisée par une rotule, les autres sont plus variables (Fig. 3.8). La ceinture de l'épaule possède plusieurs représentations, dont les spécificités visent à prévoir le plus fidèlement de comportement anatomique. Mais si elles sont plus ou moins détaillées, elles transcrivent toute le fait que le centre de rotation de la liaison GH est mobile par rapport au thorax.

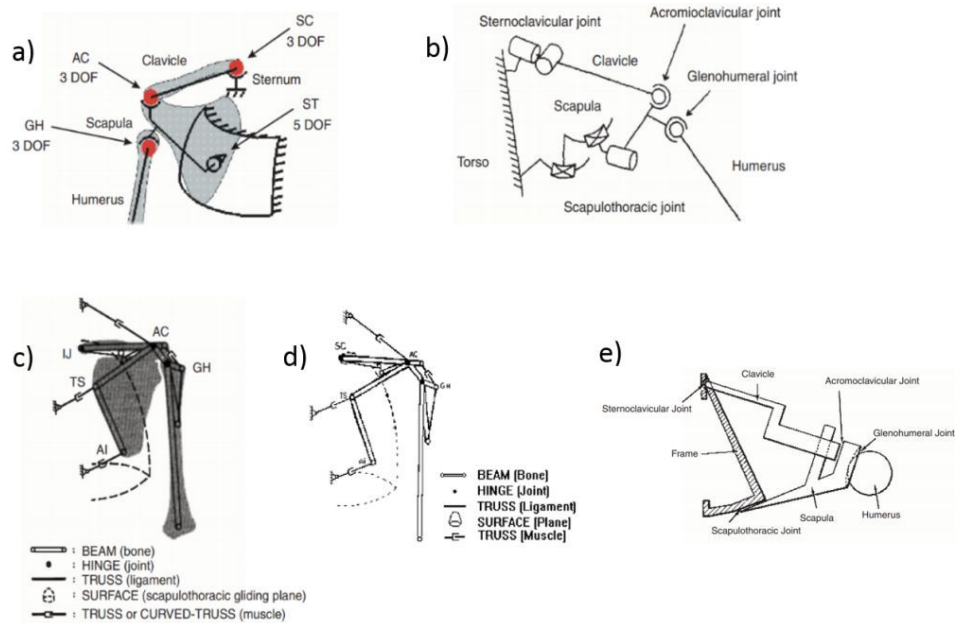


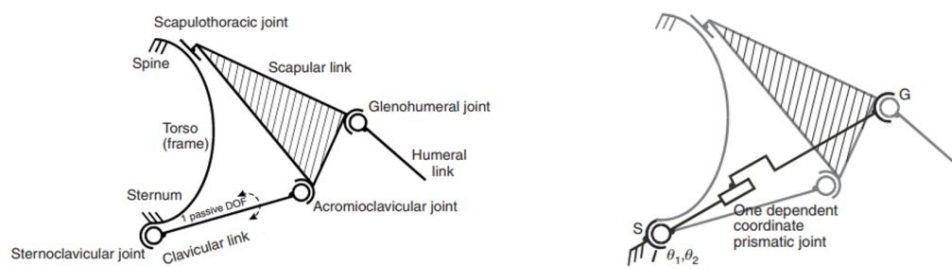
FIGURE 3.8 – Exemples de modèles d'épaules complexes dans la littérature ; a.[6], b.[7], c.[8], d.[9], e.[10].

3.2.4.3 Simplification du modèle de la ceinture de l'épaule

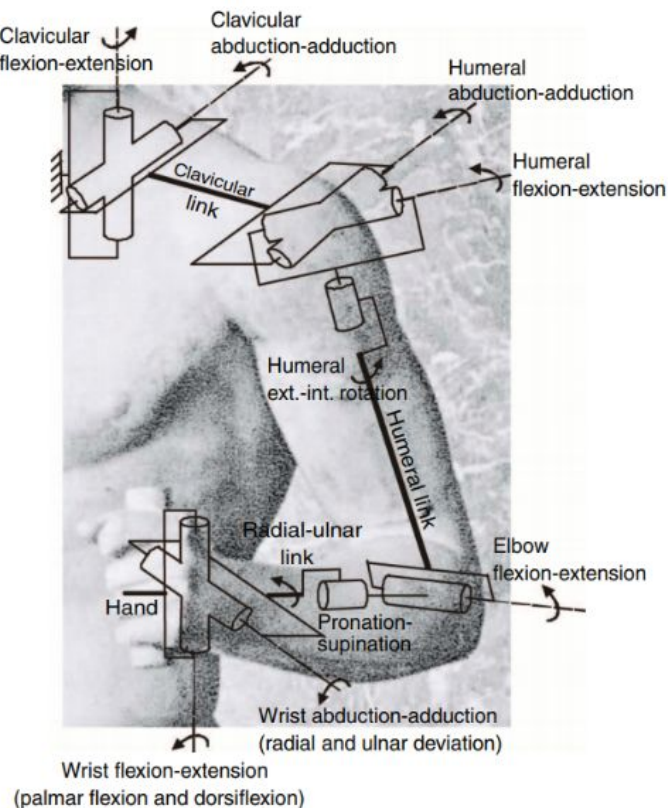
Prendre en compte le comportement interne complexifie le modèle et sa paramétrisation. Il n'est pas envisageable dans notre cas d'étude de concevoir un système capable de prendre en compte autant de variables, les dispositifs le faisant ne sont pas adaptés à une utilisation industrielle et portative [166]. A partir des observations et des comparaisons faites par [11], il est possible de déduire un modèle en chaîne ouverte proposant des mobilités similaires pour le centre de la liaison GH. Une première simplification concerne la ceinture de l'épaule, qui dans son fonctionnement peut être représentée par une liaison prismatique pilotée en fonction des angles (Fig. 3.9a). Elle conserve bien son rôle de placement de la liaison GH par rapport au thorax.

Il est possible de pousser la simplification encore plus loin, en considérant que la liaison prismatique résultante est en réalité de longueur constante (Fig. 3.9b). Cette modélisation a plusieurs avantages pour notre cas d'application. Dans un premier temps, il s'agit d'une chaîne ouverte assimilable à un bras robotique ce qui facilitera le calcul des mobilités avec l'exosquelette. De plus, la paramétrisation est simplifiée car les données anatomiques nécessaires à la construction du modèle sont limitées à la clavicle, au bras et à l'avant-bras. Enfin, cette modélisation permet de prendre en compte le déplacement du centre de rotation de la liaison GH lors du haussement des épaules par exemple. Chose qui est négligée dans la plupart des autres exosquelettes du marché.

Il est possible de pousser la simplification encore plus loin, comme de nombreux modèles d'épaule qui vont jusqu'à l'assimiler à une simple rotule [167, 168, 169, 38, 39, 170, 171, 172, 173, 174, 79]. C'est sur ces modèles que se sont basées les premières études cinématiques que j'ai réalisés. Mais ils sont trop simplifiés en termes de mobilités car un simple haussement des épaules pourrait entraîner un blocage hyperstatique du mécanisme.



(a) Simplification du complexe de la clavicule



(b) Modèle de membre supérieur final

FIGURE 3.9 – Simplification du complexe de l'épaule [11]

3.2.4.4 Schéma cinématique global du membre supérieur

Pour résumer, le modèle constitué d'une double pivot et d'une rotule au niveau de l'épaule puis d'une double pivot au niveau du coude représenté Fig.3.10 semble être un bon compromis entre la complexité des modèles fidèles à l'anatomie humaine et les modèles ne prenant pas en compte toutes les mobilités. Il permettra de valider la cinématique de l'exosquelette en s'assurant que les mobilités possibles par les membres supérieurs sont conservées.

A partir des recommandations de gabarits standards internes au Groupe PSA, il est possible de rapporter les dimensions anthropométriques sur le modèle choisi. On obtient alors un squelette moyen présenté Fig.3.10.

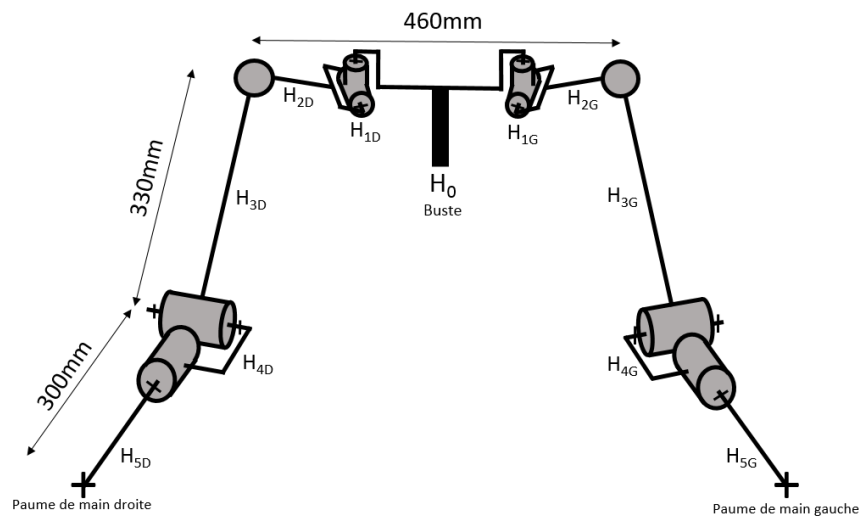


FIGURE 3.10 – Dimensions du modèle de référence humain pour un homme moyen

3.2.5 Étude des liaisons d'interaction entre exosquelette et porteur

Le choix des liaisons d'interactions entre porteur et exosquelette est très complexe. Les tissus mous qui recouvrent les membres, ainsi que les variations de morphologie introduisent de nombreuses contraintes. Comme expliqué par [175], la nature de la liaison d'interaction dépend de plusieurs critères. Le plus important concerne la direction des efforts mis en jeu. Lorsque l'effort est seulement assisté par l'exosquelette et non complètement pris en charge, il y a une transmission d'effort entre exosquelette et opérateur. C'est notamment le cas en réhabilitation où c'est l'effort d'interaction qui est piloté. C'est plus largement valide pour les exosquelettes dont l'assistance se concentre sur un membre intermédiaire dans la chaîne de transmission d'effort. Un exemple est l'exosquelette destiné au maintien bras en l'air, qui assiste le bras alors que l'effort est appliqué par l'opérateur au niveau de la main.

Le critère principal est qu'il faut limiter les mouvements des tissus mous qui recouvrent les membres, pour ne pas s'exposer à des douleurs, voire des blessures, si ces mouvements sont trop répétés. Une force selon l'axe longitudinal entraînerait forcément un glissement des tissus mous. Un DDL en translation selon l'axe longitudinal des membres doit être préféré lors du choix de la liaison. Les moments appliqués par l'exosquelette risquent d'entraîner des rotations des tissus mous autour de l'axe longitudinal des membres. Il faut donc d'abord garantir que les efforts transmis soient sécants avec l'axe longitudinal du membre. Pour éviter cela, la liaison doit comprendre les 3 DDL de rotation autour du point d'attache. Le centre de la liaison d'attache doit appartenir à l'axe longitudinal du bras. Enfin, pour limiter la pression cutanée, il est important d'avoir une surface de contact suffisamment large et souple pour ne pas causer de friction ou pression supérieures au seuil de confort.

Il semble intéressant de faire un lien entre un bras serré dans une sangle et la relation mécanique d'un arbre dans un alésage (Fig. 3.22ba). Pour rappel, la liaison résultante de ce type de montage n'est pas nécessairement une liaison pivot-glissante. Le rapport entre la longueur de prise dans l'alésage et le diamètre de l'arbre va influencer le comportement du système.

Pour un rapport $\frac{L}{D} < 0.5$, la liaison est alors équivalente à une linéaire annulaire (ou rotule si la translation est impossible) car des rotations perpendiculaires à l'axe peuvent apparaître (Fig. 3.11b).

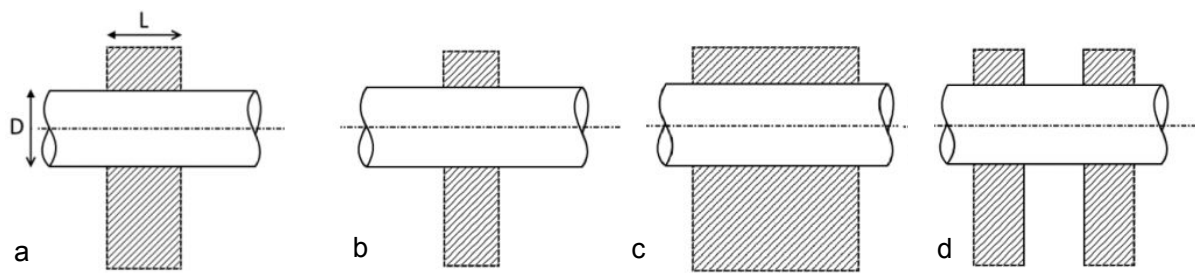


FIGURE 3.11 – Qualification des liaisons type pivot et linéaire-annulaire. a) Paramétrisation, b) Linéaire annulaire, c) Pivot, d) Pivot.

Mais si $\frac{L}{D} > 1$, la liaison est considérée comme pivot glissante ou pivot si la translation est impossible (Fig. 3.11c). Cependant, il est à noter qu'il est possible d'obtenir une liaison équivalente à un rapport $\frac{L}{D} > 1$ en couplant deux liaisons dont le rapport $\frac{L}{D} < 0.5$, comme présenté Fig. 3.11d. Lorsque le rapport est entre 0.5 et 1, la liaison peut être assimilée à l'une ou l'autre, en fonction des besoins de calculs. Le même phénomène s'observe avec la liaison d'un bras dans une sangle. Une sangle très large ou deux sangles espacées vont plus contraindre le bras pour les rotations perpendiculaires à l'axe longitudinal, alors qu'une fine laissera tous les degrés de mobilité en rotation. De plus, du fait des tissus mous qui recouvrent le corps humain et de la nécessité de ne pas serrer fermement, ces effets sont décuplés. Dans tous les cas, il semble difficile de contraindre le membre suffisamment pour bloquer les rotations perpendiculaires à l'axe longitudinal sans provoquer de gêne. La rotule comme liaison de contact directe paraît inévitable. Et c'est au final cohérent avec les degrés de liberté nécessaires.

En conclusion, le modèle le plus ergonomique semble être celui de la liaison linéaire annulaire, avec comme décomposition la rotule pour l'attache directe avec le bras et la glissière entre l'attache et l'exosquelette pour éviter les efforts selon l'axe longitudinal.

Ce raisonnement est vérifié car la plupart des exosquelettes du marché l'utilisent. Elles permettent de ne pas trop contraindre le bras et limiter la sensation de constriction. La technologie majoritairement utilisée consiste en un demi cylindre rigide et molletonné pour l'appui d'effort, et une sangle souple pour assurer le maintien du bras dedans (*Airframe, ShoulderX, EksoVest, Comau*). Il est important de noter que ces modèles appliquent des efforts unidirectionnels, c'est pourquoi la liaison n'est pas capable de transmettre des efforts importants dans toutes les directions. L'étude des efforts entre exosquelette et bras une fois le type de liaison choisie doit apporter les éléments de réponse pour la conception d'une fixation optimale.

Comme développé précédemment, l'attache préférée pour relier l'exosquelette au membres supérieur sera équivalente à une linéaire annulaire. La décomposer en deux liaisons élémentaire permet de mettre en évidence les mobilités qui devront être intégrées.

Les mobilités nécessaires aux liaisons d'interaction restent sujettes aux choix de structure et au fonctionnement de l'exosquelette. Mais il convient de choisir une liaison dont les mobilités se rapprochent autant que possible de la linéaire annulaire, laissant libre les trois rotations et la translation selon l'axe principal du membre concerné.

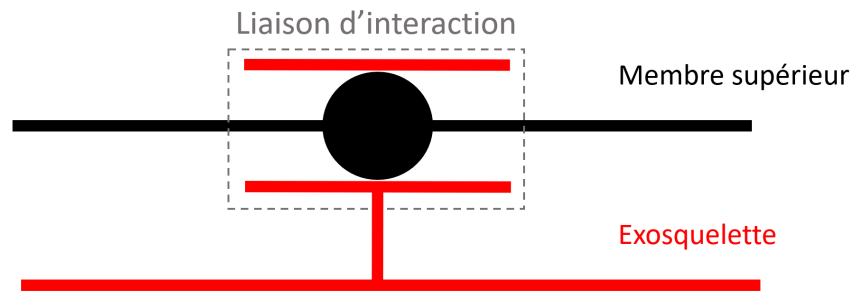


FIGURE 3.12 – Liaison d'interaction type linéaire annulaire

3.2.6 Localisation l'exosquelette sur son porteur

Les exosquelettes sont par définition des structure portées, extérieures au corps. Leur volume non nul s'ajoute donc à celui de son porteur. Dans le cas de technologies souples telles que les tissus intelligents, ce volume s'apparente à un vêtement. Mais lorsque ce sont des structures rigides qui sont utilisées, l'encombrement supplémentaire doit être pris en compte.

Les risques liés à ce sur-volume sont multiples. Dans des espaces confinés, les risques d'interaction avec l'environnement sont importants. Il est alors nécessaire de s'assurer que l'opérateur puisse atteindre son espace de travail sans endommager ce qui l'entoure. Le volume total doit rester inférieur au volume maximum admissible pour réaliser la tâche. Dans le cas du Groupe PSA, ce volume est défini par un "volume d'accès" dimensionnant l'espace minimum nécessaire au passage du membre supérieur. Pour les bras et avant-bras, il s'agit d'un cylindre de diamètre $D_{ext} = 140mm$.

L'encombrement d'une structure risque également de perturber l'espace de travail. Outre la liberté de mouvement qui sera étudiée plus tard, il est important de définir quels volumes la structure peut occuper pour s'assurer qu'elle ne perturbera pas le travail de son porteur. Nous proposons Fig.3.13 un découpage en sous-volumes, répartis autour du corps du porteur et permettant de mettre en évidence les zones qui doivent rester libre de tout encombrement.

TABLE 3.2 – Labélisation des zones d'encombrement autour du porteur

Membre concerné	Zone	Label	Membre concerné	Zone	Label
Avant-bras	interne	$AB_{int.}(g/d)$	Tête	latérale	$TE_{lat.}(g/d)$
	externe	$AB_{ext.}(g/d)$		arrière	TE_{ar}
	avant	$AB_{av.}(g/d)$		supérieur	TE_{sup}
	Bras	arrière	$AB_{ar.}(g/d)$	Torse	frontal
interne		$B_{int.}(g/d)$	dorsal		TO_{dor}
externe		$B_{ext.}(g/d)$	latérale		$TO_{lat.}(g/d)$
avant		$B_{av.}(g/d)$	Taille	frontal	TA_{fro}
arrière	$B_{ar.}(g/d)$	dorsal		TA_{dor}	
Cuisse	interne	$C_{int.}(g/d)$	Main	latérale	$TA_{lat.}(g/d)$
	externe	$C_{ext.}(g/d)$		interne	$MA_{int.}(g/d)$
	avant	$C_{av.}(g/d)$		externe	$MA_{ext.}(g/d)$
	arrière	$C_{ar.}(g/d)$	avant	$MA_{av.}(g/d)$	
Mollet	interne	$MO_{int.}(g/d)$	arrière	$MA_{ar.}(g/d)$	
	externe	$MO_{ext.}(g/d)$			
	avant	$MO_{av.}(g/d)$			
	arrière	$MO_{ar.}(g/d)$			

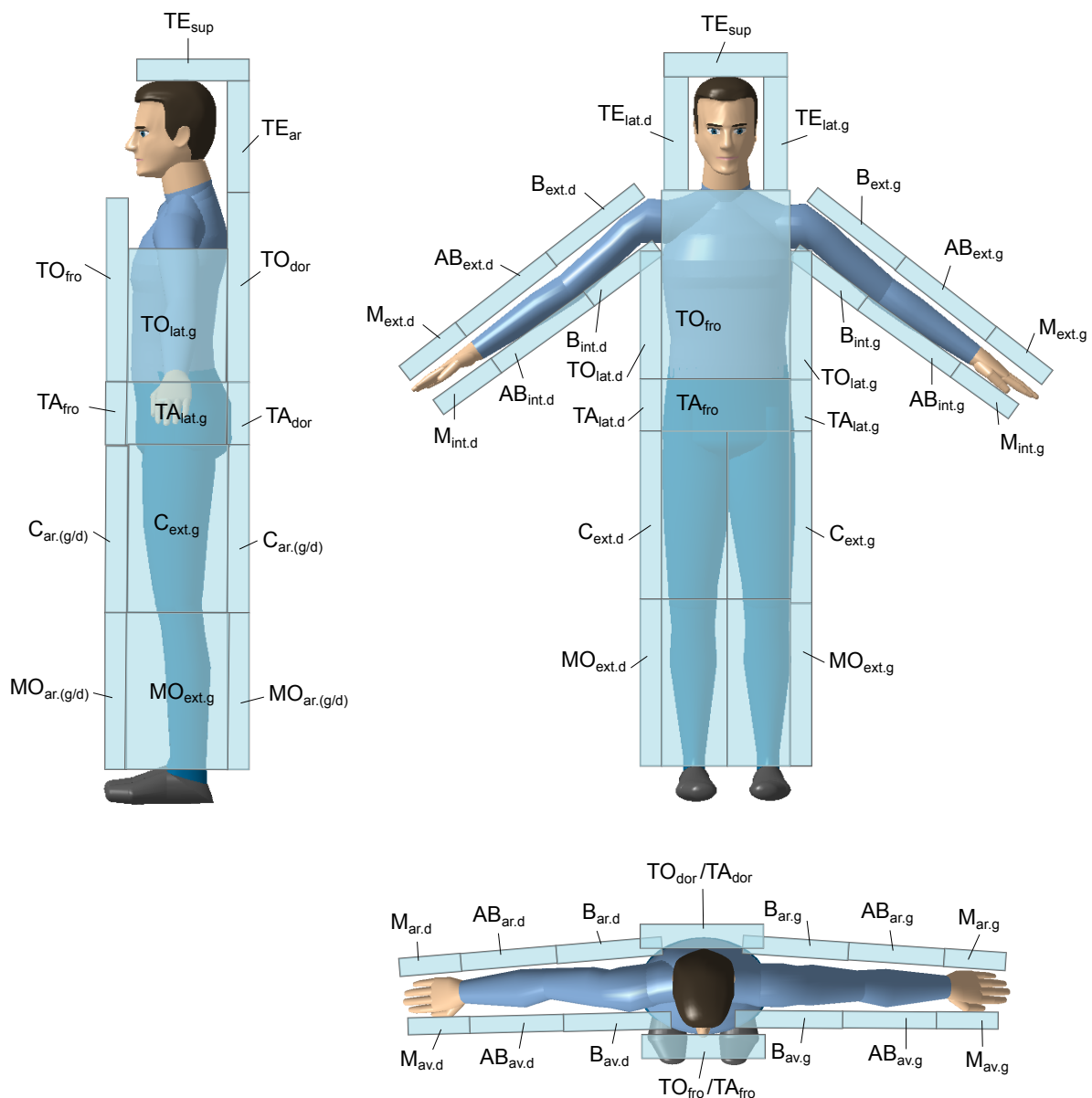


FIGURE 3.13 – Représentation des volumes d'encombrement potentiels autour du porteur de l'exosquelette

Application au cas d'usage

Dans le cadre du poste de pose des garnitures de portes, l'environnement de travail se trouve devant l'opérateur. On privilégie une structure dorsale et latérale, les zones identifiées comme libres sont listées et représentées Fig.3.14. L'opérateur sur sa zone de travail manipule des objets devant lui, au niveau de son torse. Cette zone doit rester libre, tout comme l'avant des bras qui sera très proche des objets manipulés. Le dessus et l'arrière des bras peut être occupé par l'exosquelette. En revanche, le dessous des bras n'est pas libre car cela pourrait gêner en position bras le long du corps, ou lors de manipulation des objets. En dessous du bassin, les zones ne sont pas contraintes et peuvent donc être occupées par l'exosquelette. La zone autour de la tête n'est pas contrainte par le poste.

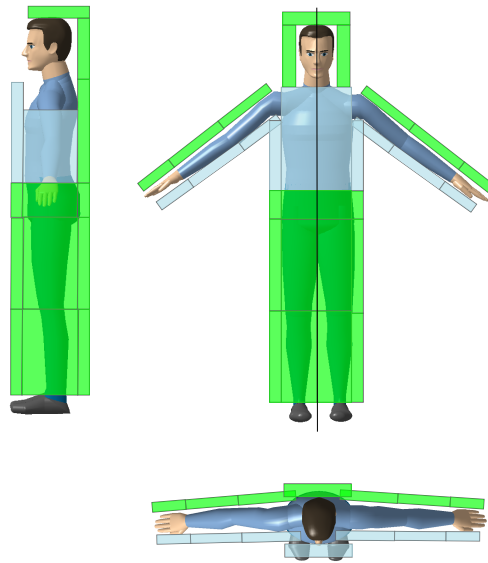


FIGURE 3.14 – Visualisation de l'encombrement autorisé pour la conception de l'exosquelette. Les zones vertes représentent les espaces que la structure de l'exosquelette peut occuper. Les bleues doivent être laissées libres pour ne pas gêner le porteur dans ses tâches.

3.2.7 Proposition d'une cinématique isostatique

L'exosquelette doit pouvoir suivre les mouvements de l'opérateur sans les perturber pour ne pas dégrader la dextérité. Il faut donc vérifier que la cinématique de l'exosquelette liée à l'opérateur permette la même liberté de mouvement dans l'espace de travail, sans générer de blocage. Les lois d'isostatisme appliquées aux mécanismes conventionnels évaluent leur montabilité et les mobilités. Il est possible d'adapter cette méthodologie aux exosquelettes, comme le démontre [12]. Cependant, cette méthode nécessite un bâti commun entre exosquelette et porteur. Dans le cas des exosquelettes de réhabilitation, souvent fixes, il est commun de considérer que le buste est fixe par rapport à l'environnement. Ces calculs se destinent plus à un exosquelette de réhabilitation, fixé sur le sol.

La première étape est de définir les degrés de mobilité des membres, pour ensuite définir des mécanismes dont la cinématique une fois liée à l'opérateur sera à minima isostatique.

Dans cette section sont détaillés les calculs de mobilité des membres supérieurs. La méthode utilisée est extraite et adaptée de la synthèse structurale des robots parallèles proposée par [81, 82].

Formalisation :

- R_{Gi} représente l'espace vectoriel des vitesses pour la branche i ,
- $S_F = \dim(R_F) = \dim(R_{G1} \cap R_{G2} \cap \dots \cap R_{Gk})$ est la connectivité du système du mécanisme F ,
- r_l^{Gi} représente le nombre de paramètres articulaires qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée de la branche Gi ,
- $r_l = \sum_{i=1}^k r_l^{Gi}$ le nombre total de paramètres articulaires qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées du mécanisme F ,
- $r_F = \sum_{i=1}^k S_{Gi} - S_F + r_l$ représente le nombre de paramètres articulaires qui perdent leur indépendance dans le mécanisme,
- $M_F = \sum_{i=1}^p f_i - r_F$ est la mobilité du système,

- $T_F = M_F - S_F$ représente la redondance. Inférieure à 0, le mécanisme est hyperstatique. Égale à 0, le mécanisme est isostatique. Supérieure à 0, le mécanisme est redondant.

Le graphique des liaisons des membres supérieurs est présenté Fig. 3.15a. Chaque bras constitue une chaîne ouverte.

Le graphe des liaisons pour le modèle de membre supérieur est visible Fig.3.15a. En considérant chaque bras comme une chaîne simple ouverte et le torse comme le bâti, l'analyse structurale du bras droit est représentée Fig.3.15b.

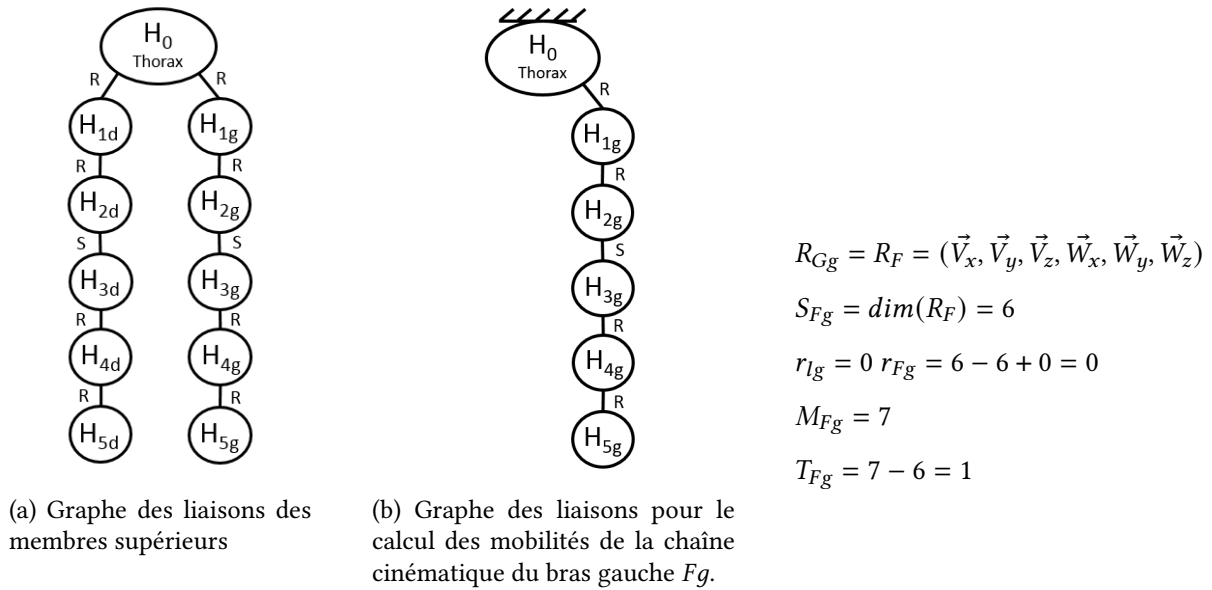


FIGURE 3.15 – Représentation en graphe des liaisons

L'avant-bras possède donc les 6 degrés de mobilités de l'espace vectoriel, avec une redondance de 1.

En supposant qu'il existe un solide fixe entre l'exosquelette et son porteur, [12] propose une méthodologie pour déterminer les liaisons porteur/exosquelette. Elle se présente sous la forme de trois règles de calcul, assurant l'isostatisme entre la structure de l'exosquelette et le corps de son porteur.

Avec n le nombre de sous-systèmes inclus, correspondant au nombre de liens entre le corps et l'exosquelette, il faut pour assurer l'isostatisme respecter les trois conditions suivantes :

$$\forall i \in [1; n], \sum_{j=1}^i l_j + e_j \geq 6.i \tag{3.1}$$

$$\forall i \in [1; n], \sum_{j=1}^{i-1} (l_j + e_j) + e_i \leq 6.i \tag{3.2}$$

$$\sum_{j=1}^n (l_j + e_j) = 6.n \tag{3.3}$$

avec l_j les degrés de liberté de la liaison d'interaction j , e_j la mobilité équivalente entre le corps $j - 1$ et j de l'exosquelette et n le nombre de boucle indépendantes du couplage porteur-exosquelette.

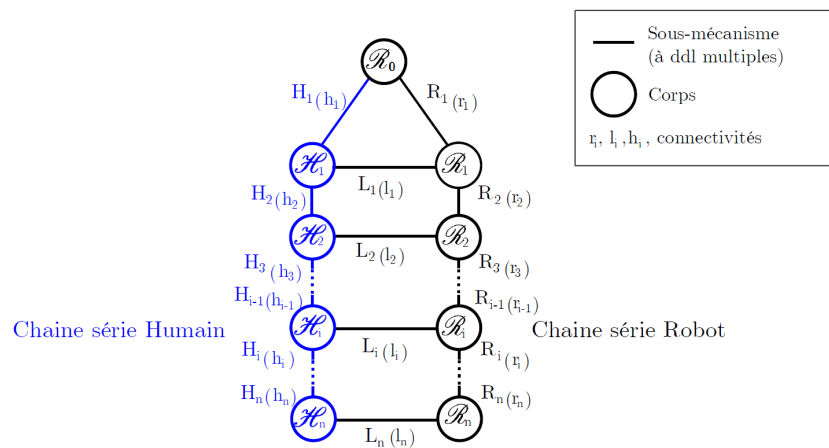


FIGURE 3.16 – Représentation du problème de couplage entre deux chaînes sérielles, selon N. Jarassé dans [12]

Application au cas d'étude

D'après les étapes précédentes, la chaîne d'efforts concerne les membres supérieurs et doit relier les avant-bras au buste. La mobilité de pronation et supination de l'avant-bras de l'opérateur sera intégrée comme une mobilité interne au système. Elle doit rester libre pour le confort de l'opérateur, et n'est pas utile pour le positionnement de l'organe terminal de l'exosquelette. Concernant les liaisons d'interaction au niveau des bras et avant-bras, elles ne sont pas censées transmettre d'efforts. Il faut donc se rapprocher des liaisons idéales décrites Étape 5.

Dans un premier temps, nous nous plaçons dans le cas d'un système symétrique et étudions donc un seul bras. Pour établir la cinématique d'une structure compatible avec le membre supérieur, nous posons le sous-système présenté Fig.3.17a.

Un moyen de s'assurer que l'espace accessible par l'exosquelette soit le même que celui du membre supérieur est de prendre une chaîne cinématique similaire au modèle humain. Ainsi on garantit que chaque segment d'exosquelette possède le même espace vectoriel de déplacement que le membre du porteur correspondant. Il faudra ensuite déterminer les liaisons d'interactions nécessaires assurant l'isostatisme entre homme et exosquelette, comme présenté Fig.3.17a. Les mobilités entre le bras et l'avant bras du corps humain sont composées d'une rotation perpendiculaire au plan bras/avant-bras au niveau du coude ainsi que d'une rotation selon l'axe longitudinal de l'avant-bras. Cette dernière mobilité étant considérée comme interne et donc laissée libre par l'attache, il ne reste que la première rotation. Celle-ci sera assurée par une liaison pivot dont l'axe devra être un maximum confondu avec celui de l'opérateur pour éviter tout déplacement relatif. Jusqu'au niveau du bras, la cinématique est égale à celle du membre supérieur. C'est au niveau du coude qu'elle diffère, avec une mobilité en moins. En effet, la rotation de l'avant-bras autour de son axe longitudinal doit être laissée libre. Il s'agira donc d'une mobilité interne, intégrée à la liaison d'interaction.

En utilisant le formalisme de N. Jarassé dans [12], le système peut être ramené à un ensemble de cinq solides (thorax H_0 , bras H_1 , avant-bras H_2 , bras exosquelette E_5 , avant-bras exosquelette E_6). Ils forment des sous-systèmes reliés par les connectivités équivalentes Fig.3.17c. A partir de l'Equ.3.3 :

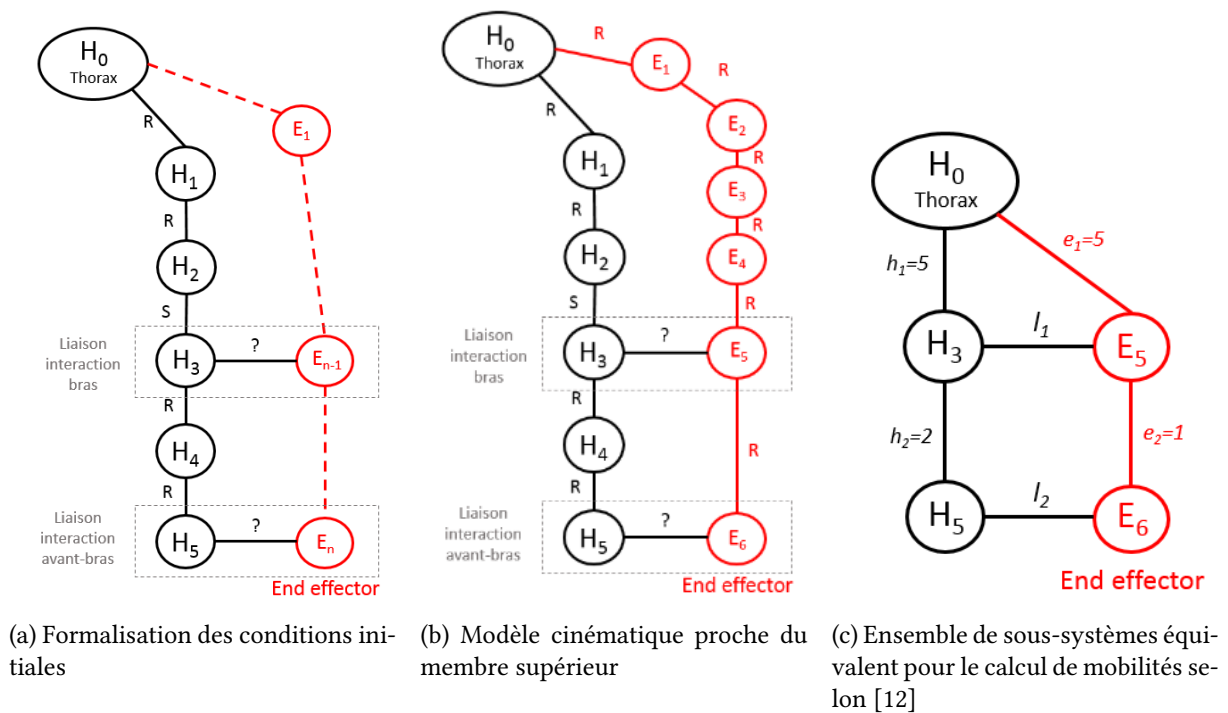


FIGURE 3.17 – Modélisation du problème de recherche d'une structure cinématique

$$\sum_{j=1}^2 l_j = 12 - \sum_{j=1}^2 e_j = 12 - (5 + 1) = 6 \quad \Leftrightarrow l_1 + l_2 = 6 \quad (3.4)$$

$$\begin{cases} \text{pour la boucle } i=1, & l_1 + e_1 \geq 6 \\ \text{pour la boucle } i=2, & l_1 \leq 6 \end{cases} \quad \Leftrightarrow 1 \leq l_1 \leq 6 \quad (3.5)$$

Il existe 12 couples de liaisons possibles pour l_1 et l_2 dont la somme est égale à 6. Ils sont représentés dans la Table 3.3. Des hypothèses sur les contraintes des liaisons permet d'éliminer certains couples. La liaison au niveau de l'avant-bras ne doit pas avoir de mobilité en translation. Dans le cas contraire, le positionnement de l'organe terminal s'avèrerait trop complexe à maîtriser et pourrait résulter en un rejet de l'équipement.

Il a été discuté plus haut du fait qu'il était difficile de contraindre en rotation les membres sans occasionner de gêne. Sous l'hypothèse que l'on cherche à choisir un modèle qui sera proche de la réalité, le seul couple validant ces conditions est rotule/rotule. Ce choix reste cohérent sachant que peu d'efforts seront échangés entre l'exosquelette et le porteur au niveau de ces liaisons, et donc peu de risques d'efforts selon l'axe longitudinal des membres. On obtient alors le modèle Fig. 3.18. Il est complexe et nécessite beaucoup de réglages pour assurer la concordance des axes rotation et ainsi éviter les déplacements relatifs entre exosquelette et opérateur. Aussi, on observe que le nombre de liaisons reliant le bras au buste sera doublé dans le cas d'un bi-bras, pour un total de 12.

Un modèle composé de deux bras reliés indépendamment au torse nécessite une chaîne cinématique

TABLE 3.3 – DDL possibles pour les liaisons d'interaction

Liaison bras

Somme									
	DDL	Pivot	Glissière	Piv-Gli	Plan	Rotule	Lin-Ann	Lin-Rect	Ponct
		1	1	2	3	3	4	4	5
Pivot	1	2	2	3	4	4	5	5	6
Glissière	1	2	2	3	4	4	5	5	6
Piv-Gli	2	3	3	4	5	5	6	6	7
Plan	3	4	4	5	6	6	7	7	8
Rotule	3	4	4	5	6	6	7	7	8
Lin-Ann	4	5	5	6	7	7	8	8	9
Lin-Rect	4	5	5	6	7	7	8	8	9
Ponct	5	6	6	7	8	8	9	9	10

Liaison avant-bras

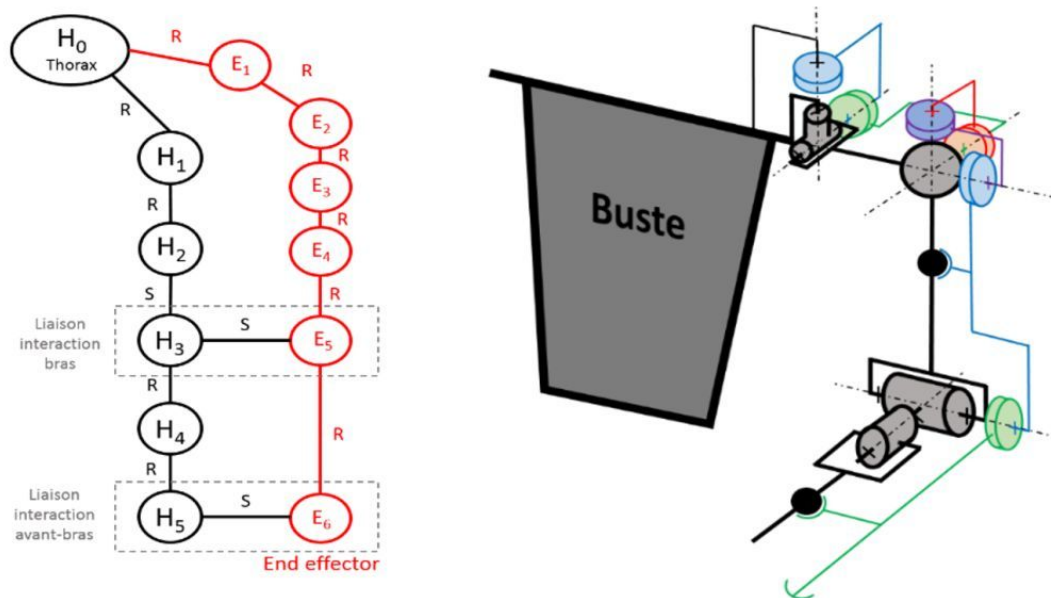


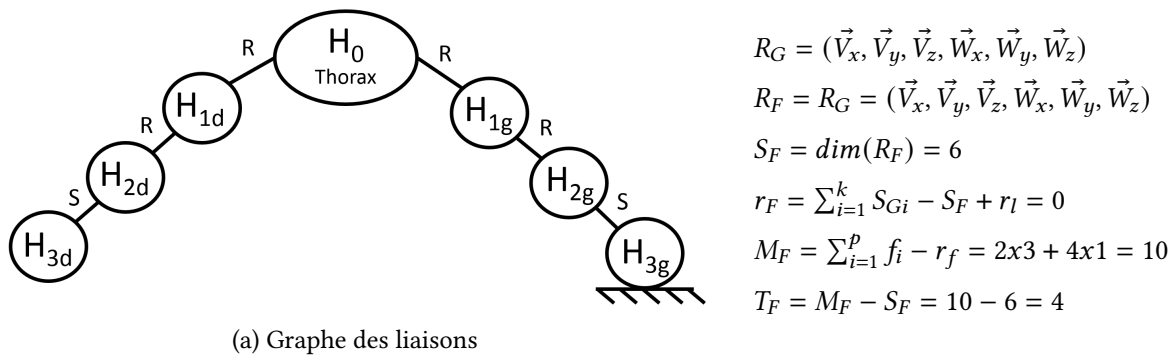
FIGURE 3.18 – Modèle cinématique mono-bras

complexe, notamment due au déplacement du centre de rotation de l'épaule. Dans notre cas d'étude, il s'avère intéressant de relier les bras entre sans passer par l'intermédiaire du buste. Selon l'hypothèse que la liaison exosquelette bras/avant-bras est une pivot, il faut trouver un mécanisme symétrique reliant le bras exosquelette droit au gauche qui garantisse la liberté de mouvement tout en limitant le nombre de liaisons.

Selon la formalisation de [81], le graphe des liaisons Fig. 3.19 représente les mobilités du bras droit par rapport au bras gauche considéré comme fixe.

Le calcul des mobilités le bras gauche H_{3g} et le bras droit H_{3d} qu'il s'agit d'une liaison à 6 DDL, composée des 3 translations et 3 rotations mais avec une forte redondance.

Pour s'assurer que les mécanismes choisis garantissent bien ces degrés de mobilité, on fixe le bras gauche de l'exosquelette et on regarde l'espace vectoriel de déplacement du bras droit. Les mécanismes retenus doivent être symétriques pour équilibrer la structure, et minimiser la redondance pour limiter



(a) Graphe des liaisons

FIGURE 3.19 – Chaîne raccourcie entre le bras gauche H_{3g} (bâti) et le bras droit H_{3d} (organe terminal) pour le calcul d'un mécanisme simplifié inter-épaules.

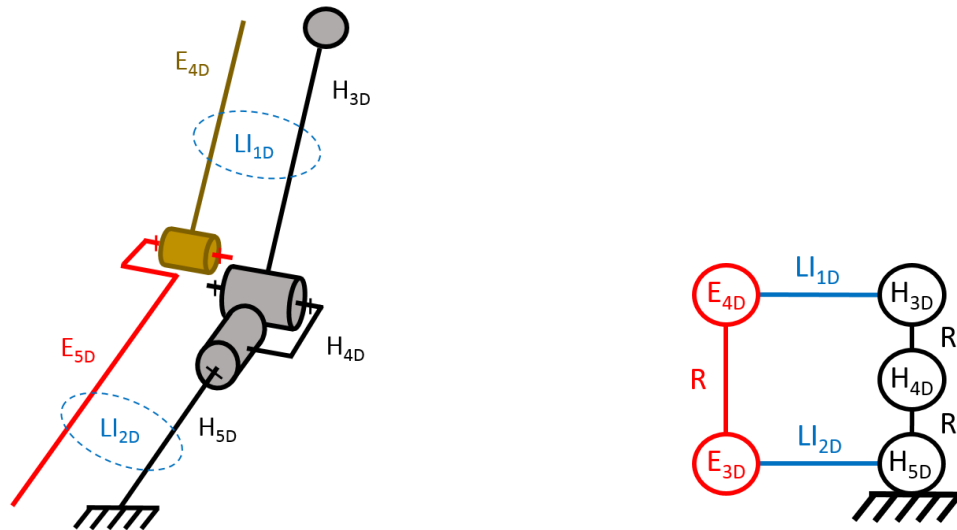
le nombre de liaisons nécessaires. Quatre mécanismes sont proposés Table 3.4.

TABLE 3.4 – Propositions de cinématique pour relier les bras droit et gauche de l'exosquelette

Schéma cinématique	Calcul des mobilités	Analyse
	$M_F = 8$ $T_F = 2$	Il y a deux degrés de redondance, au niveau de la translation des bras le long de leur axe longitudinal et de la rotation selon l'axe de la barre dorsale transverse.
	$M_F = 7$ $T_F = 1$	Il y a un degré de redondance, au niveau de la rotation des bras autour l'axe de la glissière.
	$M_F = 7$ $T_F = 1$	Il y a un degré de redondance, au niveau de la translation des bras le long de leur axe longitudinal.
	$M_F = 6$ $T_F = 0$	Il n'y a aucune redondance. Le nombre de liaison est optimisé au maximum.

La solution D semble la plus adaptée. Elle est isostatique, et la liaisons Pivot-glissante, plus complexe, est située dans le dos limitant ainsi l'inertie sur les bras. On est donc certains qu'en fixant de manière rigide les bras du porteur sur l'exosquelette, l'isostatisme sera assuré. Il reste à ajouter les avant-bras au modèle pour compléter la chaîne cinématique. Une unique liaison pivot entre le bras et l'avant-bras de l'exosquelette suffit comme vu précédemment dans le modèle mono-bras. Il reste à déterminer les liaisons d'interaction. L'isostatisme étant assuré entre les bras, on se concentre uniquement sur l'ensemble composé du bras/avant-bras comme présenté Fig. 3.20.

Une pièce immobile est soumise à 6 composantes d'efforts, composées de trois vecteurs de forces et



(a) Schéma cinématique de l'ensemble bras/avant-bras du porteur et de la structure exosquelette correspondante

(b) Graphe des liaisons associé

FIGURE 3.20 – Formalisation cinématique du problème de recherche des liaisons d'interaction LI du bras droit.

trois vecteurs de moment. Le principe fondamental de la statique (PFS) fournit 6 équations permettant de résoudre ces 6 inconnues. Dans le cas d'un assemblage immobile composé de p pièces dont un bâti (l'immobilité du bâti n'est pas utile pour la suite), le nombre total d'équations s'élève donc à $6 \cdot (p - 1)$. Si l'assemblage possède des mobilités, des équations statiques sont alors supprimées. Les mobilités utiles m_u sont celles recherchées lors de la conception, tandis que les mobilités inutiles m_i permettent au mécanisme de s'adapter à certaines contraintes sans pour autant nuire au fonctionnement. Le nombre d'équations statiques est alors égal à $E_s = 6 \cdot (p - 1) - m_u - m_i$.

Si le nombre d'inconnus I_s est supérieur au nombre d'équations, le mécanisme est hyperstatique. S'ils sont égaux, il est isostatique. Enfin, si le nombre d'inconnues est inférieur au nombre d'équations, le mécanisme est hypostatique. Le degré d'hyperstatisme h est alors défini par : $h = I_s - 6 \cdot (p - 1) + m_u + m_i$, correspondant à :

- $h < 0$: hypostatisme ;
- $h = 0$: isostatisme ;
- $h > 0$: hyperstatisme.

Avec X_1 et X_2 , le nombre de composantes d'efforts transmis respectivement dans les liaisons d'interaction LI_1 et LI_2 :

$p = 5$ le nombre de pièces du mécanisme

$I_s = 5 \times 3 + X_1 + X_2$ la somme des inconnues statiques

$m_u = 1$ (Position angulaire du coude pilotée)

$m_i = 1$ (Rotation libre de l'avant-bras du porteur selon son axe longitudinal)

$h = I_s - 6 \cdot (p - 1) + m_u + m_i = 15 + X_1 + X_2 - 24 + 1 + 1 = -7 + X_1 + X_2$

L'isostatisme de l'ensemble est vérifié pour $h = 0$. Afin de remplir cette condition, la somme des composantes d'effort transmises par les deux liaisons d'interaction doit vérifier $X_1 + X_2 = 7$. Pour deux

liaisons, cela équivaut à trouver un couple possédant 5 DDL au total. D'après le Tab. 3.3, plusieurs couples de liaisons possibles sont identifiés.

Le couple linéaire-annulaire pour LI_1 et pivot pour LI_2 est retenu. Au niveau du bras, la liaison assure un confort optimal en ne transmettant que des efforts normaux à l'axe longitudinal. Une liaison pivot au niveau de l'avant-bras permettra d'assurer un bon contrôle de l'exosquelette en gardant l'orientation de l'organe terminal constant, facilitant son acceptabilité et son maniement. La rotation laissée libre autour de son axe longitudinal limite les perturbations sur la dextérité. Si la liaison pivot peut transmettre des efforts potentiellement inconfortables, elle est cependant nécessaire ici et représente un compromis avec les contraintes de fonctionnement et les faibles efforts qui transitent. Le modèle cinématique global est présenté Fig. 3.21.

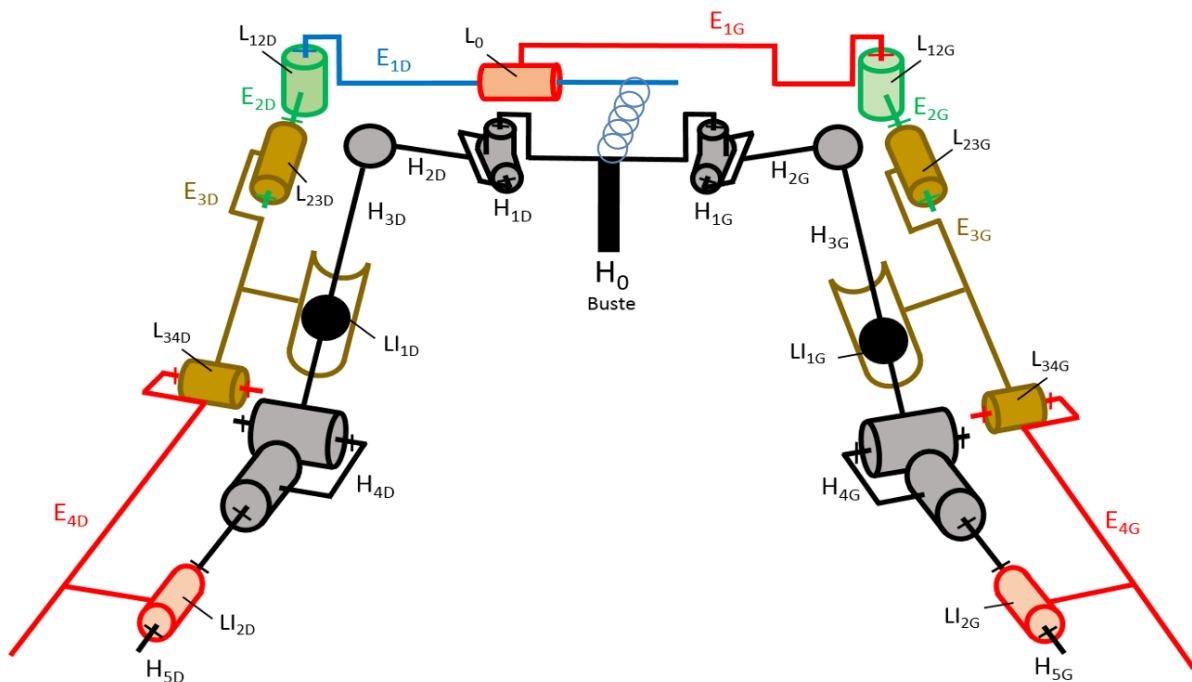


FIGURE 3.21 – Modèle cinématique isostatique bi-bras global

Au total, l'exosquelette est composé de 7 liaisons devant être pilotées. Il y a 6 pivots, et une pivot-glissante. 2 technologies différentes sont à étudier : Bloquer une liaison pivot, et bloquer une translation. Il y a également 4 liaisons d'interaction, 2 pivots et 2 linéaires annulaires.

3.2.8 Compatibilité morphologique

Le choix d'une cinématique similaire à celle des membres supérieurs aura plusieurs avantages. Le premier est que l'espace de travail sera sensiblement le même de par sa conception, et que les singularités seront aussi mieux gérées. D'un côté plus subjectif, un système dont le fonctionnement se rapproche du membre sur lequel il est fixé semble naturellement compatible. Il sera plus facile d'appréhender l'encombrement s'il est équivalent à une sur-épaisseur des membres.

Le paramétrage des dimensions de l'exosquelette a pour données d'entrées les dimensions anatomiques, mais aussi les conditions géométriques liées à la structure de l'exosquelette. Il faut s'assurer que dans les positions extrêmes, l'exosquelette ne va pas entrer en contact avec son porteur de manière non

prévue. Outre les dimensions des parties mobiles, le placement des liaisons est primordial. Un désaxage peut entraîner des déplacements et des efforts dans les liaisons d'interaction.

Application au cas d'usage

Après la modélisation d'un premier prototype sous Catia, un problème de conception apparaît. Les axes de rotation de la structure au niveau de l'épaule n'étant pas confondus avec ceux de l'opérateur, des déplacements relatifs entre la structure de l'exosquelette et son porteur apparaissent. Ils sont notamment importants concernant les parties E_{1D} et E_{1G} , lors de l'élévation d'un seul bras. Les liaisons du corps humain peuvent être décomposées pour la plupart en rotations élémentaires, et il apparaît important de faire correspondre leurs axes de rotation avec les axes de rotation des liaisons exosquelettes correspondantes. Ajout de la redondance au niveau de l'élévation du bras pour que la partie dorsale soit fixe par rapport au dos et non liée à un des bras.

Il existe plusieurs cinématiques équivalentes à celle retenue. Il est notamment possible de décomposer toutes les liaisons en liaisons élémentaires comme les pivots et glissières. La rotule peut se transformer en une série de trois pivots d'axes concourants. Il semble intéressant de limiter la diversité de liaisons dans l'exosquelette, pour en faciliter le prototypage et standardiser ses composants. Les liaisons pivots sont les plus répandues dans les structures exosquelette, car elles permettent de piloter ou suivre indépendamment les mobilités biomécaniques de l'opérateur en faisant correspondre les axes de rotation.

En ajoutant un degré de redondance pour la flexion/extension des bras, la partie dorsale ne se déplace plus. Cependant, la redondance ajoute une mobilité interne et le compas dorsal doit être maintenu en position. Ce n'est pas une problématique ici, car l'effort transitant par ce compas il sera nécessairement attaché au buste. La liaison pivot glissante de la partie dorsale peut ainsi être transformée en glissière simple du fait qu'une rotation de même axe a été ajoutée à chaque épaule. En faisant correspondre les centres de rotation des épaules du porteur avec les axes de rotation des liaisons de l'exosquelette, on obtient le modèle présenté Fig. 3.22a. La glissière permet à l'entraxe des centres de rotation des épaules de varier. Cette mobilité peut également être réalisée par une liaison pivot dans le même plan que celles auxquelles elle est rattachée, formant ainsi un compas dorsal comme présenté Fig. 3.22b. On obtient finalement un modèle à 9 DDL, uniquement composé de liaisons pivots.

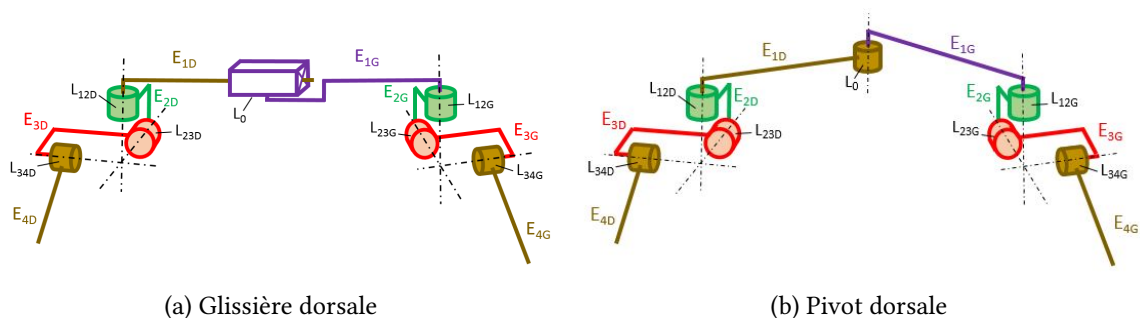


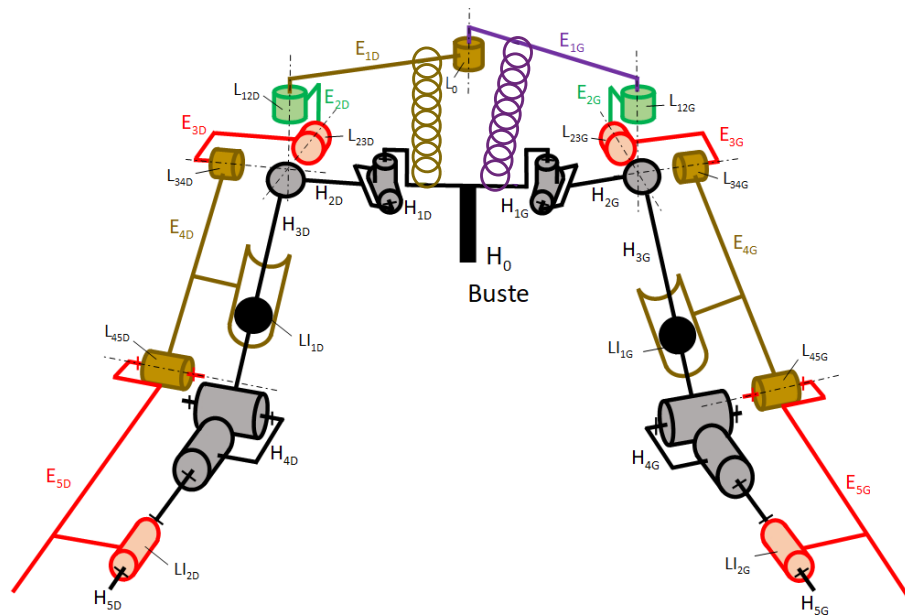
FIGURE 3.22 – Cinématique de la structure dorsale

Le système global obtenu peut se décliner en deux configurations différentes, selon la liaison de l'épaule utilisée pour former le compas dorsal.

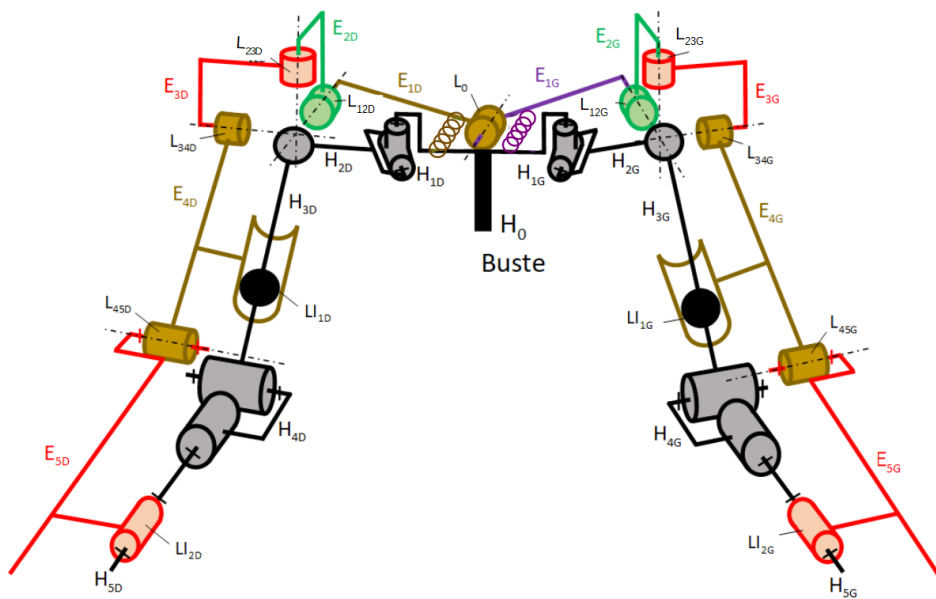
La première repose sur la rotation médiale/latérale, avec un compas horizontal dont les axes sont parallèles à l'axe longitudinal comme montré Fig. 3.23a. Le problème principal de cette configuration concerne les liaisons L_{23} qui touchent les omoplates lors de l'ouverture du bras vers l'extérieur. De

plus, les liaisons L_{12} sont situées au dessus des épaules et sont proches du visage. Aussi, la transmission d'effort entre le compas dorsal et le buste semble plus complexe du fait de leur éloignement.

Une deuxième approche consiste à utiliser les rotations de flexion/extension, les axes de rotation du compas dorsal étant perpendiculaires aux axes sagittaux des épaules (Fig. 3.23b). Cette configuration a l'avantage de dégager la zone autour de la nuque. De plus, le plan formé par les trois pivot de la partie dorsale permettra de transmettre les efforts et situé au niveau du buste. Les fixations nécessaires à cet endroit permettront donc à la fois de maintenir la partie dorsale malgré la redondance, mais aussi de transmettre les contre-efforts de l'assistance. C'est cette configuration qui est sélectionnée.



(a) compas dorsal horizontal



(b) compas dorsal vertical

FIGURE 3.23 – Modèle cinématique bi-bras

Le compas dorsal permet de compenser l'écartement des épaules au travers de la liaison L_0 et ainsi assurer l'alignement des autres liaisons de l'épaule. Les longueurs de E_{1D} et E_{1G} doivent vérifier une condition de longueur suffisante pour que lors de l'écartement maximal des rotules des épaules, la configuration n'atteigne pas la singularité où les axes des liaisons L_0 , L_{12D} et L_{12G} sont dans le même plan (Fig. 3.24a).

Avec :

$l_{e,max}$ la distance maximale entre les centres de rotation des épaules du porteur,

δ_e la distance minimale à garantir lors de l'écartement maximal des centres de rotation des épaules du porteur,

Condition géométrique : $l_{11} \geq \sqrt{\frac{l_{e,max}^2}{2} + \Delta_e^2}$ Pour $l_{e,max} = 460mm$, et $\Delta_e = 30mm$, on obtient $l_{11} \geq 232mm$

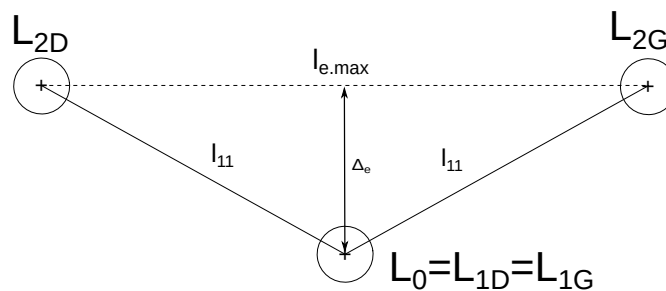


FIGURE 3.24 – Longueur des parties dorsales

Lors de l'abduction des bras (rotation selon l'axe sagittal), les liaisons L_{2D} et L_{2G} peuvent entrer en contact avec le dessus des épaule et les trapèzes du porteur. Pour garantir l'abduction minimum requise par le cas d'usage (60°), nous proposons un déphasage des liaisons L_{23} et L_{34} autour de l'axe sagittal. La contrepartie sera le couplage des rotations de ces liaisons lors de mouvements autour des axes longitudinaux et transversaux. Pour trouver la valeur minimale de α_e vérifiant les conditions géométriques de non contact avec le porteur, l'épaisseur des tissus mous situés au dessus de l'épaule e_{ep} et du bras e_{br} sont pris en compte. La distance entre le centre de rotation de l'épaule et l'ensemble cou/tête e_{te} permet de s'assurer que la structure ne touchera pas le cou du porteur. Ils sont illustrés Fig. 3.25a. Puis ils sont intégrés au modèle d'épaule simplifié présenté Fig. 3.25b, comprenant le squelette de la rotule de l'épaule, l'épaisseur des tissus mous ainsi que le placement des liaisons L_{23} et L_{34} .

La résolution est faite graphiquement au moyens d'une esquisse paramétrable, dans laquelle sont introduites toutes les conditions géométriques.

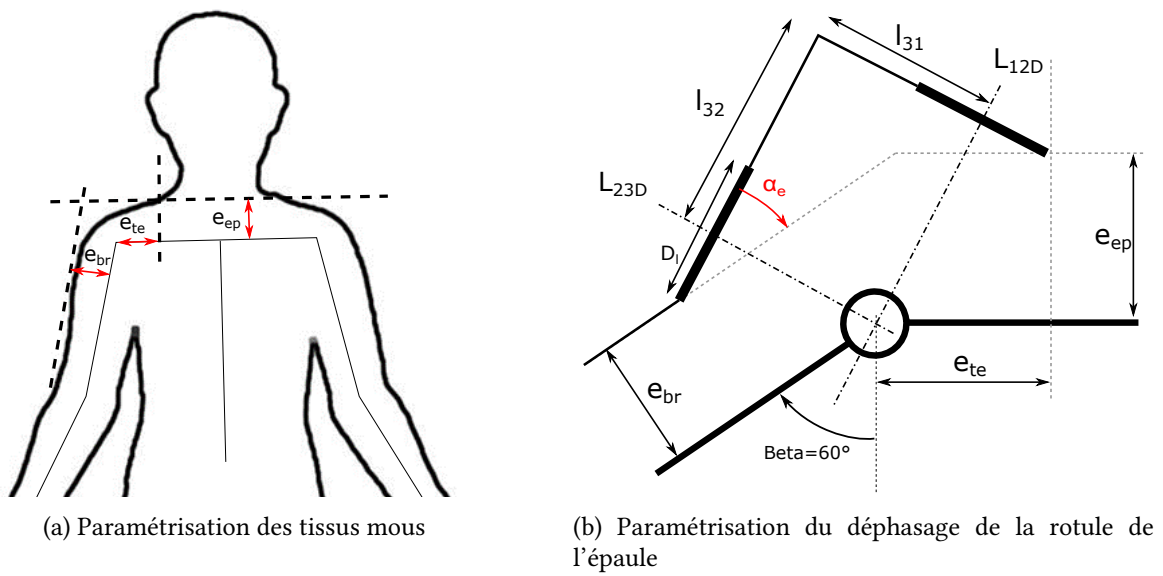


FIGURE 3.25 – Représentation schématique de l'épaule pour le calcul du déphasage minimum α_e . Avec e_{br} l'épaisseur de tissus mous maximal entre l'axe longitudinal du bras et sa surface, e_{ep} la hauteur entre l'axe passant par les centres de rotation des épaules et le sommet des épaules, e_{te} la distance entre le centre de rotation de l'épaule et la tête.

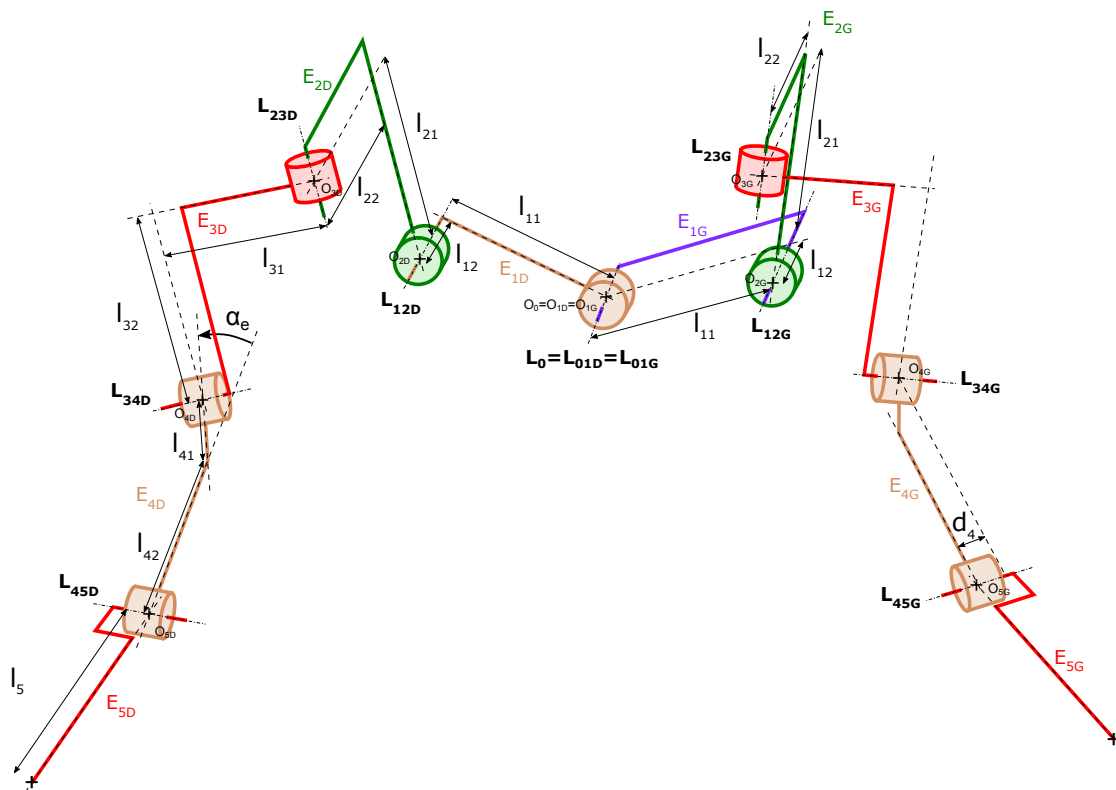


FIGURE 3.26 – Modèle cinématique paramétré complet de la structure, avec $d_4 = \sin(\alpha_e) * l_{41}$

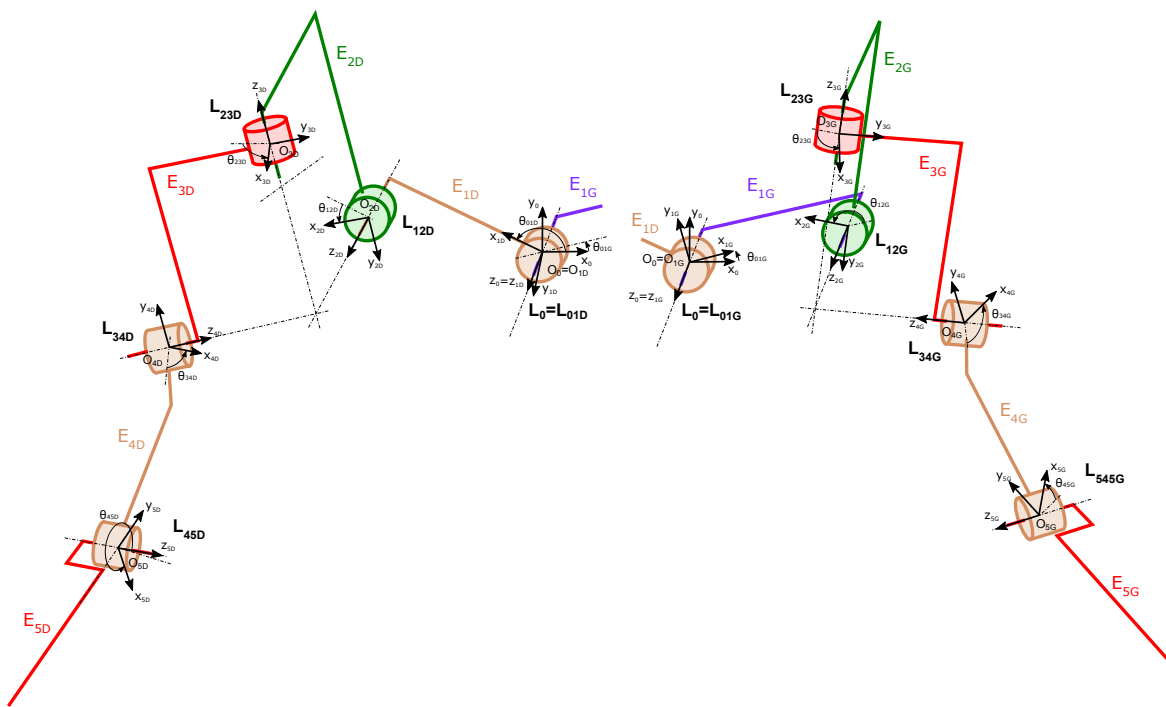


FIGURE 3.27 – Modèle de Denavit-Hartenberg de l'exosquelette proposé

L_i	$E_{i-1} \rightarrow E_i$	α_i	a_i	d_i	$\theta_{i-1,i}$	L_i	$E_{i-1} \rightarrow E_i$	α_i	a_i	d_i	$\theta_{i-1,i}$
L_{01D}	$E_0 \rightarrow E_{1D}$	0	0	0	θ_{01D}	L_{01G}	$E_0 \rightarrow E_{1G}$	0	0	0	θ_{01G}
L_{12D}	$E_{1D} \rightarrow E_{2D}$	0	l_{11}	l_{12}	θ_{12D}	L_{12G}	$E_{1G} \rightarrow E_{2G}$	0	l_{11}	l_{12}	θ_{12G}
L_{23D}	$E_{2D} \rightarrow E_{3D}$	$+\pi$	0	$+l_{21}$	θ_{23D}	L_{23G}	$E_{2G} \rightarrow E_{3G}$	$+\pi$	0	$+l_{21}$	θ_{23G}
L_{34D}	$E_{3D} \rightarrow E_{4D}$	$-\pi$	0	$-l_{31}$	θ_{34D}	L_{34G}	$E_{3G} \rightarrow E_{4G}$	$-\pi$	0	$-l_{31}$	θ_{34G}
L_{45D}	$E_{4D} \rightarrow E_{5D}$	α_e	0	d_4	θ_{45D}	L_{45G}	$E_{4G} \rightarrow E_{5G}$	α_e	0	d_4	θ_{45G}

TABLE 3.5 – Tableau des paramètres du modèle de Denavit-Hartenberg

3.2.9 Optimisation du placement des liaisons d'interaction

La structure de l'exosquelette vise à être la plus légère possible pour limiter l'impact du poids sur son porteur. La déformation sous charge est directement liée au module d'Young (E) des matériaux, une valeur plus élevée signifiant une résistance à la flexion plus forte. Il faut donc, pour chaque matériaux, trouver un compromis entre la quantité de matière utilisée et les déformations acceptables.

3.2.10 Proposition d'un modèle de raideur de l'exosquelette

3.2.10.1 Modèle de Denavit-Hartenberg

Appréhendé comme une structure rigide semblable à des bras robotiques, il est possible d'utiliser la formalisation de Denavit-Hartenberg [176].

3.3 Conclusions de la formalisation

A partir des observations et tests réalisés avec des exosquelettes du marché, de nombreuses problématiques communes ont été identifiées. Les règles de conception centrées utilisateurs extraites de ces problématiques ont permis de mettre en évidence des axes de conception qui garantissent la pertinence du concept développé. Neufs étapes clés permettant d'obtenir un concept d'exosquelette sont formalisées, depuis la spécification du besoin jusqu'à l'optimisation de certaines propriétés de la structure. Les règles de conception détaillées en première partie y sont intégrées.

La méthodologie est appliquée au fur et à mesure au cas d'application sélectionné dans le Chapitre précédent, à savoir la pose des garnitures de portes. Un concept innovant est proposé. Il est basé sur la rigidification d'une structure suivant les mouvements des membres supérieurs pour transmettre les efforts des avant bras au buste, et a abouti au dépôt d'un brevet [P2].

Synthèse dimensionnelle

Sommaire

4.1	Réalisation de la liaisons bloquante pilotée	90
4.1.1	Cahier des charges	90
4.1.2	Solutions technologiques	92
4.1.2.1	F1 : Guider en rotation deux mobiles	92
4.1.2.2	F2 : Bloquer la rotation de la liaison	93
4.1.3	Proposition d'un concept adapté de la roue libre	97
4.1.3.1	Description du fonctionnement des roues roue libres usuelles	98
4.1.3.2	Contact de Hertz	99
4.1.4	Dimensionnement de la liaison bloquante	104
4.1.4.1	Paramétrisation	104
4.1.4.2	Conditions d'arc-boutement	105
4.1.4.3	Pressions de contact	105
4.1.5	Dimensionnement du prototype de liaison bloquante	106
4.2	Conception de la structure d'essai	106
4.2.1	Prototypage de la structure exosquelette	107
4.3	Conclusions de la partie expérimentale	109

A partir de la formalisation proposée, un concept innovant d'exosquelette des membres supérieurs a été développé. Il est composé d'un système de blocage des liaisons et d'une structure mécanique. Dans ce chapitre sont détaillés la réalisation des liaisons quasi-passives ainsi que le prototype de structure.

4.1 Réalisation de la liaisons bloquante pilotée

Le fonctionnement de l'exosquelette repose sur la rigidification de sa structure pour transmettre les efforts. Le principe de la liaison repose donc sur deux fonctions technologiques. La première est d'assurer la liaison pivot en mode libre. Il faut limiter les frottements, tout en assurant un bon guidage des parties mobiles. La seconde, concerne le blocage de ce degré de liberté. Il doit pouvoir être réalisé dans n'importe quelle position, rapidement, et être capable de transmettre un couple très important.

Pour limiter la diversité des pièces et réduire le temps de conception et de réalisation, le choix s'est porté sur le développement d'une unique liaison capable de supporter les efforts maximaux transmis dans les liaisons lors de la phase de poussée. Cette orientation s'inscrit dans une volonté de standardisation des composants, pour simplifier la maintenance et réduire les coûts de production.

Dans un premier temps, les contraintes de fonctionnement et les efforts articulaires sont identifiés pour alimenter le cahier des charges. Ensuite, un état de l'art est réalisé sur les technologies pouvant répondre aux attentes du mécanisme recherché. Un concept innovant est ensuite proposé, puis les étapes de dimensionnement et réalisation sont détaillées. Enfin, un protocole de caractérisation est mis en place pour valider le concept.

4.1.1 Cahier des charges

Cette liaison doit répondre aux attentes fonctionnelles du concept, mais aussi résister aux conditions normales d'utilisation. Pour cela, un cahier des charges est mis en place avec pour objectif de lister toutes les fonctionnalités et contraintes de dimensionnement.

Pour déterminer les contraintes mécaniques de chaque liaison de l'exosquelette, un premier modèle de la structure est réalisé en corps rigides indéformables et liaisons bloquées sous ADAMS.

La configuration de la structure est équivalente à la celle du porteur en position d'appui, avec les bras verticaux orientés vers le bas et les avant-bras horizontaux (Fig. 4.1a). Pour obtenir un effort total de 120N, une force équivalente $F_e = 60 N$ selon l'axe de l'avant-bras est appliquée au niveau de chaque extrémité de la structure tandis que la base du compas dorsal est considéré fixe par rapport au bâti. L'étude d'un seul bras est nécessaire, l'autre étant obtenu par symétrie. Toutes les contraintes mécaniques sont listées dans le Tableau 4.1.

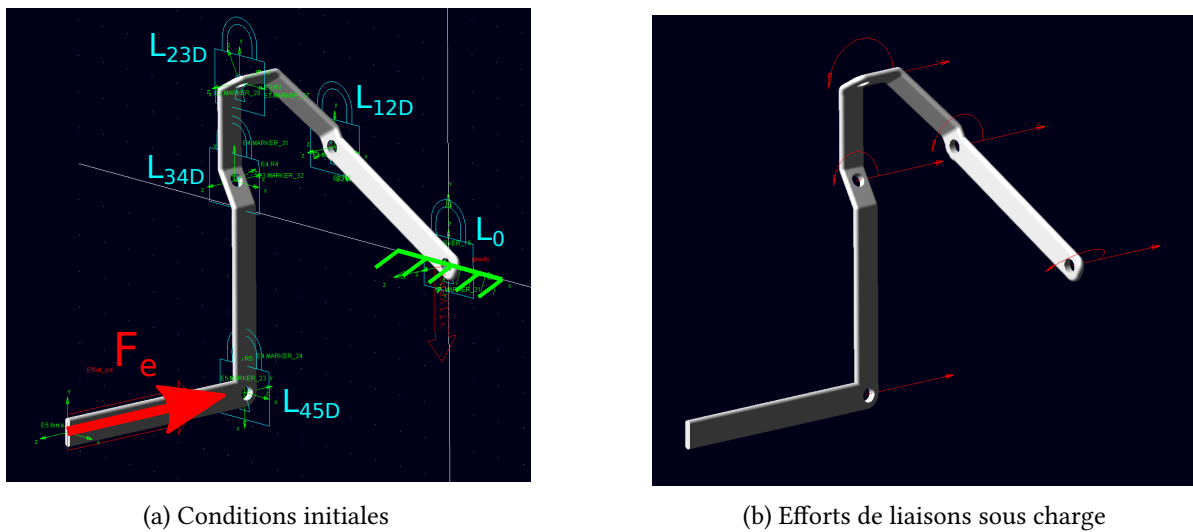


FIGURE 4.1 – Simulation de la structure mono-bras sous ADAMS

TABLE 4.1 – Liste des efforts pour chaque liaison du demi-exosquelette étudié

	Torseur dans R_0		Axe de rotation de liaison	Effort axial (N)	Effort radial (N)	Couple axial (N.m)	Couple radial (N.m)
L_{45D}	0	0	\vec{x}_0	0	120	0	0
	0	0					
	120	0					
L_{34D}	0	-34,9	\vec{z}_{4D} $\vec{x}_{4D} = -\vec{z}_0$ $\vec{y}_{4D} = -\sin \alpha \cdot \vec{x}_0 + \cos \alpha \cdot \vec{y}_0$ $\vec{z}_{4D} = \cos \alpha \cdot \vec{x}_0 + \sin \alpha \cdot \vec{y}_0$	0	120	31,3	15,6
	0	-2,2					
	120	0					
L_{23D}	0	-51,7	\vec{z}_{3D} $\vec{x}_{3D} = \vec{z}_0$ $\vec{y}_{3D} = \cos \alpha \cdot \vec{x}_0 + \sin \alpha \cdot \vec{y}_0$ $\vec{z}_{3D} = -\sin \alpha \cdot \vec{x}_0 + \cos \alpha \cdot \vec{y}_0$	0	120	25,8	44,9
	0	-0,1					
	120	0					
L_{12D}	0	-39,7	\vec{z}_0	0	120	0	40,2
	0	6,1					
	120	0					
L_0	0	-25,1	\vec{z}_0	120	0	0	42
	0	33,7					
	120	0					

Le couple axial définit la contrainte mécanique résultant du blocage du degré de liberté de la liaison. Il s'agit du couple fonctionnel de la liaison permettant de rigidifier la structure. Il dimensionne donc la partie blocage. Les autres contraintes (couple radial, efforts) sont dimensionnantes pour le guidage pivot de la liaison. Nous considérons les contraintes de dimensionnement de la liaison comme les valeurs maximales des contraintes mécaniques appliquées à chaque liaison. La Fig. 4.2 représente les différents flux identifiés pour la liaison blocante, et la Tab. 4.2 liste ces différents flux.

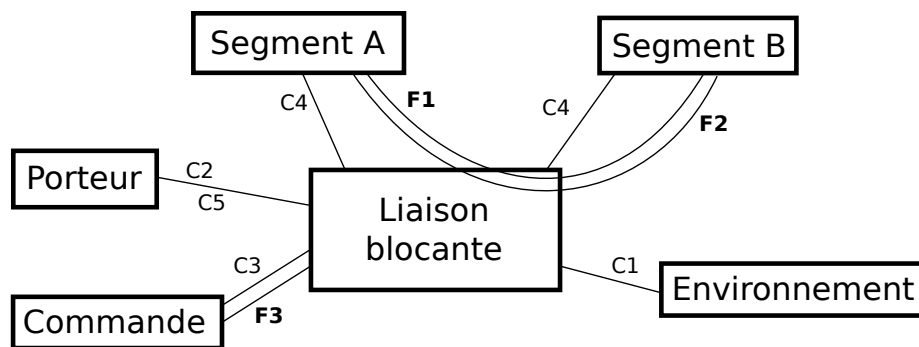


FIGURE 4.2 – Diagramme des flux de la liaison blocante

TABLE 4.2 – Cahier des charges de la liaison bloquante

N°	Fonction
F1	Guider en rotation un segment A par rapport à un segment B
F1.1	Supporter une charge axiale de 120 N
F1.2	Supporter une charge radiale de 120 N
F1.3	Supporter un couple radial de 45 Nm
F2	Piloter le DDL en rotation de la liaison entre le segment A et le segment B
F2.1	Bloquer la rotation dans n'importe quelle position et transmettre un couple axial maximal de 32 Nm
F2.2	Débloquer complètement la liaison
F3	Contrôler le verrouillage de la liaison
C1	Encombrement maximum de diamètre 80mm pour 25mm de hauteur
C2	Masse inférieure à 0.2kg
C3	Temps de réaction du système inférieur à 0.5s
C4	Liaisons d'interface compatibles avec les segments de l'exosquelette
C5	Pincement ou blocage impossible dans la liaison

4.1.2 Solutions technologiques

Le cahier des charges a mis en évidence deux fonctions principales : le guidage en rotation de la liaison pivot, et le blocage de ce degré de liberté et l'actionnement nécessaire au pilotage de la liaison.

4.1.2.1 F1 : Guider en rotation deux mobiles

Dans cette section sont listés les différentes solution technologiques pouvant répondre la Fonction 1 présentée Fig. 4.3.

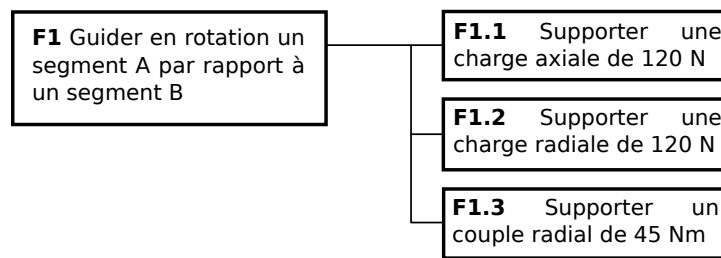


FIGURE 4.3 – Diagramme FAST de la Fonction 1 : Guider en rotation un segment A par rapport à un segment B

Qu'ils soient à billes, à rouleaux cylindriques ou coniques, les roulements sont très largement répandus. Ils permettent un guidage rigide avec de très faibles coefficients de frottements. Leur poids peut être élevé, et leur prix également. Les paliers lisses sont plus légers, et adaptés aux basses vitesses comme c'est le cas ici. C'est finalement cette solution technologique qui est retenue.

4.1.2.2 F2 : Bloquer la rotation de la liaison

Dans cette section sont listés les différentes solution technologiques pouvant répondre la Fonction 2 présentée Fig. 4.4. Les solutions étudiées doivent pouvoir bloquer une rotation, mais être totalement réversible.

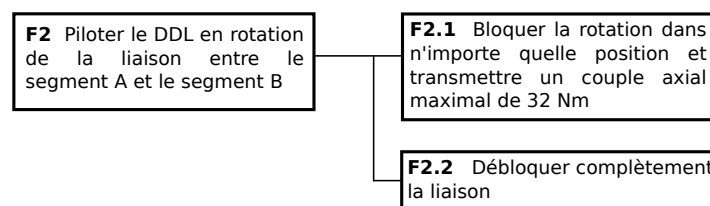


FIGURE 4.4 – Diagramme FAST de la Fonction 2 : Piloter le DDL en rotation de la liaison entre le segment A et le segment B

Disques de friction

La technologie de freinage par disques de friction est largement utilisée, que ce soit pour les freins ou les embrayages. Les applications les plus courantes concernent des freinages de type dynamique, comme les freins à disques ou les embrayages automobiles. Cependant, pour les efforts statiques importants dans un volume réduit, la friction est rapidement limitée par l'effort de pression nécessaire et le coefficient de frottement des matériaux.

Le modèle proposé par la société Unicum, présenté Fig. 4.5a, propose une solution capable de bloquer un couple statique de 50 Nm pour un poids de 1.2 kg. Ces systèmes se destinent à des freinages dynamiques. Cette solution n'est pas envisageable vues les contraintes de poids de l'exosquelette et le nombre important d'actionneurs nécessaires.

Serrage concentrique

Le serrage concentrique est assuré par la fermeture d'une bague enveloppant un axe (Fig. 4.5b). Le blocage résulte de la friction entre la bague et l'axe. Le couple de serrage obtenu est fonction du coefficient de frottement, de l'effort de serrage et de la surface. L'avantage principal est la faible course d'actionnement nécessaire, mais l'effort de serrage requis est élevé (plusieurs kN).

Bague de frettage

Comme la bague de serrage concentrique, la bague de frettage bloque la rotation par friction (Fig. 4.5c). Une pièce conique s'insère entre la bague et l'axe, qui lors de son serrage vient en contact avec ces deux pièces. La transmission de couple est importante, mais il faut pour cela appliquer un effort de serrage homogène autour de l'arbre ce qui nécessite un effort important. Ce système n'est pas adapté pour des cycles de blocage / déblocage répétés, car une fois bloqué, le pincement des pièces rend le déblocage difficile.



(a) Embrayage Multidisques Unicum [177]

(b) Bague de serrage concentrique

(c) Bague de frettage

FIGURE 4.5 – Exemples de blocage en rotation par friction

Champ électromagnétique

Le blocage électro-magnétique n'est ici pas adapté, car il consomme une énergie électrique importante pour une masse élevée. Ils sont destinés à des freinages dynamiques. Pour exemple, le frein magnétique présenté Fig. 4.6 consomme 25 W et pèse 2 kg pour un couple statique maximum de 40 Nm.



FIGURE 4.6 – Frein électromagnétiques Miki Pulley [13]

Les liaisons par obstacle de type engrenage permettent de transmettre des couples beaucoup plus élevés, mais ce type de mécanisme entraîne une discrétisation des positions de blocage possibles. Il est cependant possible d'en augmenter le nombre en réduisant le module de denture, ou en ajoutant des mobilités supplémentaires permettant d'aligner les dents avant blocage.

Système à engrenages non réversible

Un système de transmission est irréversible lorsque la rotation de l'engrenage d'entrée entraîne la rotation de l'engrenage de sortie, mais pas inversement. C'est notamment le cas des transmissions à fort rapport de réduction. Les exemples les plus répandus sont le couple roue - vis sans fin (Fig. 4.7a) et réducteurs planétaires, ou encore les systèmes à engrenages parallèles moins bien moins compacts (Fig. 4.7b). En mode non assisté, une commande en couple permettrait de compenser les inerties et frottements lors des mouvements. Puis, lors du blocage, le caractère non réversible assure seul l'arrêt de la liaison et la transmission d'efforts. La puissance moteur nécessaire se limiterait donc à la compensation hors assistance. Mais la prise sur une unique dent impose un module et un diamètre trop important pour satisfaire les contraintes d'encombrement et de précision.

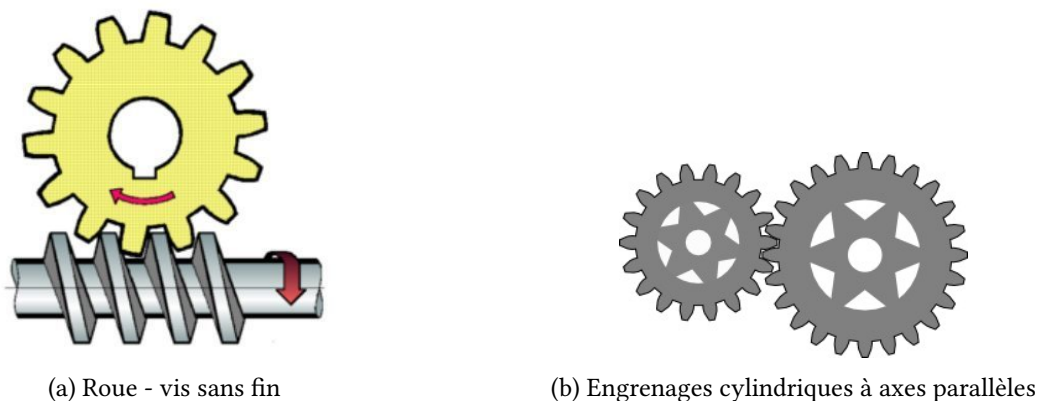


FIGURE 4.7 – Transmission par engrenage

Arbre cannelé

La transmission par arbres cannelés permet d'augmenter le nombre de dents en prise, au détriment de la discrétisation. Une denture de faible module permettrait de se rapprocher d'un fonctionnement continu. Mais les efforts importants ne permettent pas de réduire suffisamment les tailles de dents. Il est possible de compenser la discrétisation en rajoutant une mobilité en rotation autour de l'axe de l'arbre pour assurer l'alignement des dents, mais la complexité du mécanisme résultant ne permet pas de considérer cette solution comme satisfaisante.

Denture axiale

Les freins à denture axiale s'alignent automatiquement grâce au profil de la denture. Un exemple est présenté Fig. 4.9. Pour un couple statique transmissible de 100 Nm, la masse est de 1.5 kg.

Cette solution semble tout de même prometteuse car elle permet de transmettre de fort couple avec un temps de réponse très faible. Mais le poids et l'encombrement des produits présents sur le marché sont encore trop importants pour satisfaire le cahier des charges. De plus, cette solution n'assure un blocage qu'à certaines valeurs d'angle.

Roue libre

L'exemple le plus répandu des roues libres est celui des vélos. En bloquant uniquement dans le sens

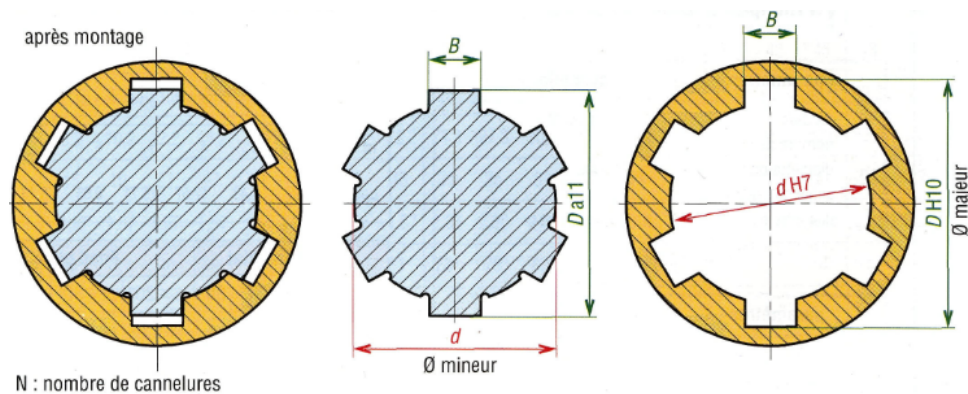


FIGURE 4.8 – Couplage par arbre cannelé, NF E 22-131

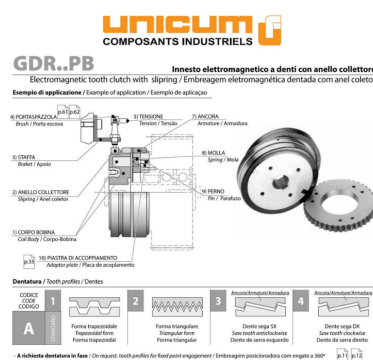


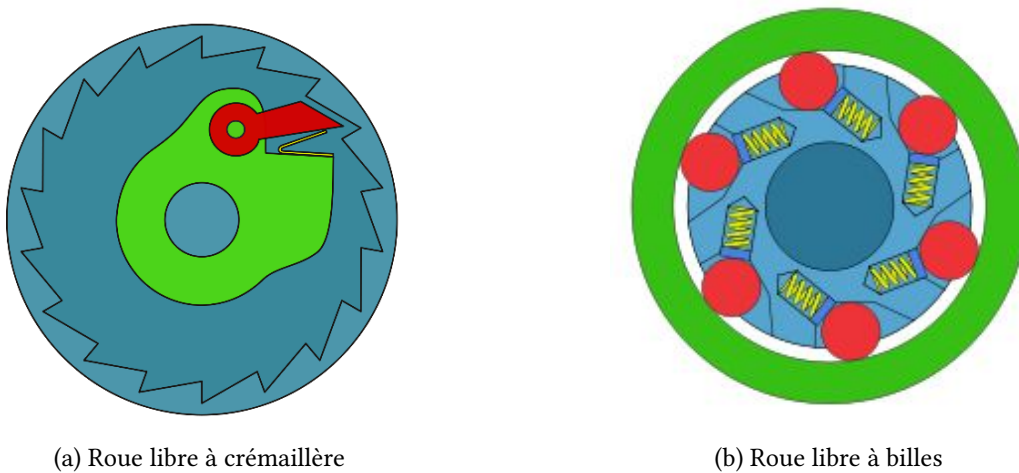
FIGURE 4.9 – Embrayage à denture axiale Unicum [14]

du couple moteur, elle permettent de transmettre l’effort de pédalage à la roue arrière sans que le pédalier soit entraîné par la roue arrière. Elles bloquent la rotation entre un noyau intérieur et une cloche extérieure au travers de mobiles.

Il en existe deux types. Le premier est basé sur la roue à rochet (Fig. 4.10a). Des mobiles en liaison pivot sur le noyau, précontraints par un ressorts, sont maintenus en contact avec la crémaillère de la cloche. Dans le sens de rotation libre, les cliquets glissent sur les dents de la crémaillère produisant le son caractéristique de cliquetis. Mais dans le sens de blocage, les cliquets se bloquent contre les dentures empêchant ainsi la rotation du noyau par rapport à la cloche. Le couple important nécessite une denture large, mais ici la matière travaille plus en compression et moins en flexion. Mais tout comme les engrenages, il reste le problème de discrétisation du fonctionnement. De plus, ce mécanisme induit un jeu angulaire nécessaire au fonctionnement de la phase de blocage, l’arrêt en rotation n’est pas instantané.

Un deuxième type de roue libre utilise des rouleaux, précontraints par des ressorts, qui roulent sur le noyau (Fig. 4.10b). Dans le sens de rotation libre, les mobiles sont poussés dans leur cavité autour du noyau et roulent dans la cloche. Mais dans le sens de blocage, les rouleaux sont poussés en contact entre la cloche et le noyau, bloquant le mécanisme par arc-boutement. Un premier dimensionnement laisse penser que cette solution est envisageable aux vues des contraintes d’encombrement fixées.

Il existe également les roues bi-directionnelles pilotables (Fig. 4.11). Leur blocage et déblocage est réalisé au travers d’un levier manuel agissant directement sur l’écartement des rouleaux. Leur masse annoncée est de de 3.3 kg pour un couple transmissible maximal de 100 Nm.



(a) Roue libre à crémaillère

(b) Roue libre à billes

FIGURE 4.10 – Principes de roues libres uni-directionnelles. En prenant le noyau comme référence fixe au bâti, la rotation est bloquée dans le sens anti-horaire.



FIGURE 4.11 – Roue libre bidirectionnelles pilotée manuellement par un levier, de la marque SIAM RING-SPANN S.A

Les poids des solutions techniques disponibles sur le marché sont élevés, mais cela vient du fait que la plupart des roues libres doivent pouvoir s'actionner à une vitesse de rotation élevée et donc subir des chocs dynamiques importants. Dans notre cas, l'actionnement a lieu à vitesse très faible, il n'y a pas d'effet inertiel et on peut raisonner en statique lors du dimensionnement.

4.1.3 Proposition d'un concept adapté de la roue libre

La roue libre repose sur le principe suivant : les mobiles (billes, rouleaux cylindriques ou coniques), se déplacent et bloque le noyau avec la cloche. Généralement, le mobile est précontraint avec une pièce élastique qui garantit le contact permanent avec la cloche. Lors de la rotation de la cloche dans le sens libre, le mobile roule et reste maintenu dans la zone avec jeu. Quand le cloche tourne dans le sens de blocage, le mobile est entraîné par frottement par la cloche et roule jusqu'à la position d'arc-boutement. Ce genre de mécanisme est monodirectionnel, ne bloquant qu'un sens de rotation tandis que l'autre est libre. Il existe des roues libres bidirectionnelles. La rotation de la cloche peut être bloquée dans les deux sens simultanément, en pilotant le déplacement des rouleaux ou billes par un actionneur extérieur.

Ce dispositif permet de réaliser la liaison pivot entre une pièce A et une pièce B, et d'en bloquer le degré de liberté sur commande. En mode inactif, la liaison est équivalente à une pivot dont le degré de liberté en rotation est laissé libre tout en minimisant les frottements. Lors de son actionnement, le dispositif bloque le degré de rotation dans les deux sens, la liaison résultante est alors une liaison encastrement.

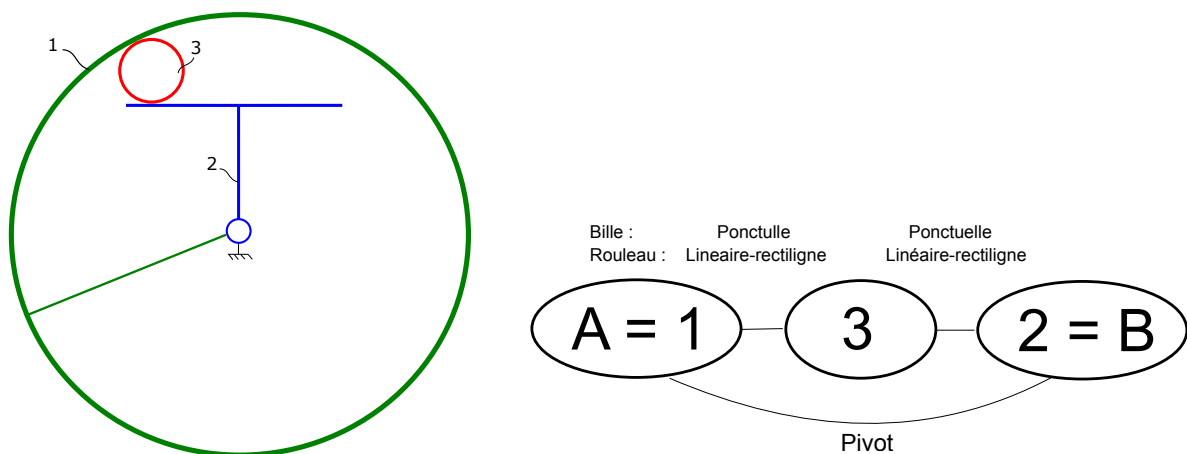
Les systèmes de roue libre offrent l'avantage de bloquer des couples importants, dans n'importe quelle position et avec une grande rigidité. C'est ce principe technologique que nous avons retenu comme solution technologique de la liaison de blocage de l'exosquelette.

4.1.3.1 Description du fonctionnement des roues libres usuelles

Les roues libres assurent la liaison pivot entre deux pièces A et B tout en permettant de bloquer le DDL en rotation selon certaines configurations. Elles sont composées de trois sous-ensembles fondamentaux de pièces (Fig. 4.12a) :

- le *cloche* 1 fixé à la pièce A ;
- le *noyau* 2 fixé à la pièce B ;
- les *mobiles* 3.

La *cloche* 1 et le *noyau* 2 sont en liaison pivot (Fig. 4.12b). C'est le déplacement des *mobiles* 3 qui contrôlent le blocage de la liaison. En mode libre, les mobiles guidés par le *noyau* 2 ne sont pas en contact avec la *cloche* 1. Lorsque le blocage est recherché, les mobiles se déplacent et entrent en contact avec la *cloche* 1. Le couple exercé sur la pièce A est alors transmis à la pièce B au travers des 3 sous-ensembles de la liaison.



(a) Schéma cinématique : La cloche 1, le noyau 2 et le mobile 3

(b) Graphe des liaisons, dans le cas de roue libres à billes ou à rouleaux(cylindriques ou coniques)

FIGURE 4.12 – Cas standard d'une roue libre à un mobile

Le phénomène d'arc-boutement est un blocage entre deux solides en contact, engendré par les frottements. Il peut être recherché comme pour les serre-joints, ou néfaste dans le cas des tiroirs de meubles. L'arc-boutement survient lorsque deux pièces maintiennent leur position par adhérence de manière permanente quelle que soit la valeur de l'effort appliquée. Pour garantir l'arc-boutement, il faut donc vérifier que la résultante de chaque contact reste dans leur cône de frottement respectif.

4.1.3.2 Contact de Hertz

Le dimensionnement de ces systèmes repose en grande partie sur la théorie des contact de Hertz, qui décrit le contact entre deux pièces élastiques en mettant en relation les modules d'élasticité des matériaux, la force de contact normale et les courbures des surfaces en contact. La première publication remonte à 1882, dans "On the contact of elastic solids" présenté par Heinrich Hertz [15].

Hertz a travaillé sur la compréhension des effets de forces appliquées sur les propriétés optiques de lentilles empilées. Il mis ainsi en évidence que la pression de contact entre deux surfaces courbes soumises à une charge dépend de l'effort de contact normal, des rayons de courbures et des modules d'élasticité de chaque pièce. La théorie du contact de Hertz fait partie des fondements de la mécanique des contacts élastiques avec des champs d'application variés, du dimensionnement de roulements aux engrenages.

Soit le contact de deux cylindres de longueur L , de diamètre D_1 et D_2 , possédant des modules d'Young respectifs E_1 et E_2 ainsi que des coefficient de Poisson respectifs ν_1 et ν_2 . La zone de contact est dans ce cas un rectangle de longueur L et de demi-largeur b (Fig. 4.13).

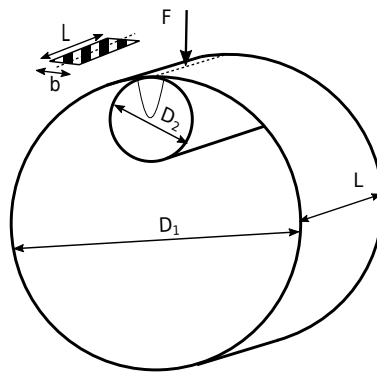


FIGURE 4.13 – Description du contact de Hertz [15]

$$b = \frac{2.F(\frac{1}{E_1^*} + \frac{1}{E_2^*})}{\pi.L(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1})} \quad \text{avec} \quad \frac{1}{E_i^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (4.1)$$

Il est ensuite possible de déterminer la pression maximale de contact, située sur la ligne parallèle aux axes des cylindres au milieu de la surface de contact :

$$P_{max} = \frac{2.F}{\pi.b.L} \quad (4.2)$$

Dans le cas particulier d'un arbre de diamètre D , de longueur L et soumis à une force radiale F , dans un alésage sans jeu et en déformation élastique, la pression de contact est alors exprimée par :

$$P(\theta) = P_{max}.\cos(\theta) \quad \text{avec} \quad P_{max} = \frac{4.F}{\pi.L.D} \quad (4.3)$$

La roue libre utilise des *mobiles* de forme cylindrique ou quasi cylindrique. Cette forme leur permet de rouler librement sur le noyau entre la position libre et de blocage. L'inconvénient majeur vient du fait que le rayon de courbure des *mobiles* doit rester faible, augmentant ainsi les pressions de contact

lors de la transmission d'effort.

Un premier dimensionnement a mis en évidence que l'utilisation d'un mobile roulant sur le *noyau* ne permettait pas de transmettre le couple recherché à cause d'une pression de contact résultante beaucoup trop élevée. Pour palier à ce problème, nous avons cherché à augmenter les surfaces de contact entre le *noyau* et les *mobiles*, ainsi qu'entre les *mobiles* et la *cloche*. Pour cela, il faut choisir des rayons de courbure proches, convexe pour l'un et concave pour l'autre.

Le mécanisme proposé est adapté de la roue libre décrite précédemment (4.14). La *cloche* 1 (Fig. 4.15a), en liaison encastrement avec la pièce A. Le *noyau* 2 (Fig. 4.15b), en liaison encastrement avec la pièces B au travers du *couvercle* 5 (Fig. 4.15e), est en liaison pivot avec la *cloche* 1. Un *couvercle* 5 est fixé de manière rigide sur le *noyau* pour faciliter le montage et l'encastrement avec la pièce B.

Le terme "gilet" remplacerait avantageusement le terme "mobile" partout dans la thèse. Les *galets* (Fig. 4.15c), sont en liaison pivot avec le *noyau* (Fig. 4.15f). Cela permet une meilleure répartition des efforts de pression avec une surface de contact semi-cylindrique et non plus linéaire ou ponctuelle. De plus, le mobile n'ayant plus besoin de rouler dans la cavité du noyau, il est possible de lui donner la forme souhaitée. En choisissant une courbure très proche de celle de la *cloche* au niveau de la zone de contact, l'effort de pression est considérablement réduit.

La *couronne* 4 (Fig. 4.15d) est en liaison pivot avec le *noyau* 2 et en liaison ponctuelle avec chaque *gilet* 3 au travers d'un pion souple glissant dans une rainure. La rotation de la *couronne* guide ces pions, et leur déplacement entraîne la rotation des galets (Fig. 4.14).

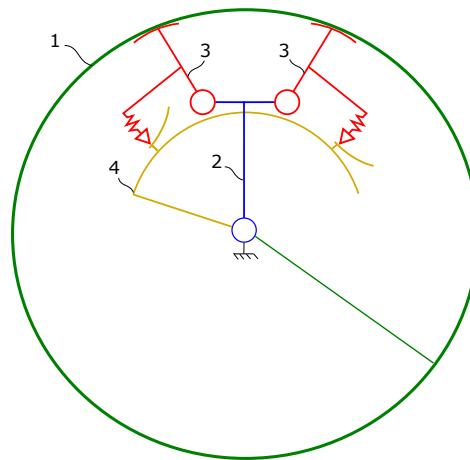


FIGURE 4.14 – Schéma cinématique du concept de liaison blocante pour une paire de galets : la *cloche* 1, le *noyau* 2, les *galets* 3 et la *couronne* 4.

Pour assurer la même capacité de blocage dans les deux sens de rotation, les *galets* sont montés par paire en opposition (Fig. 4.16a). Le nombre de paires dépend des contraintes mécaniques et volumiques de la liaison. En supposant que le *noyau* est fixe, et que la *cloche* doit être bloquée en rotation, les *galets* droits bloquent la rotation de la *cloche* dans le sens horaire (Fig. 4.16b) tandis que les *galets* gauches bloquent la rotation de la *cloche* dans le sens anti-horaire (Fig. 4.16c).

Les galets ont deux positions de fonctionnement. Non-frottant, correspondant à la liaison en mode libre, ou frottant, correspondant à la liaison en mode bloqué. La position ouverte des galets doit garantir qu'il n'y a aucun contact entre ces derniers et la cloche. La position fermée doit garantir le contact avec la cloche pour qu'il y ait blocage. Pour changer d'état, les galets sont pilotés au travers de la couronne.

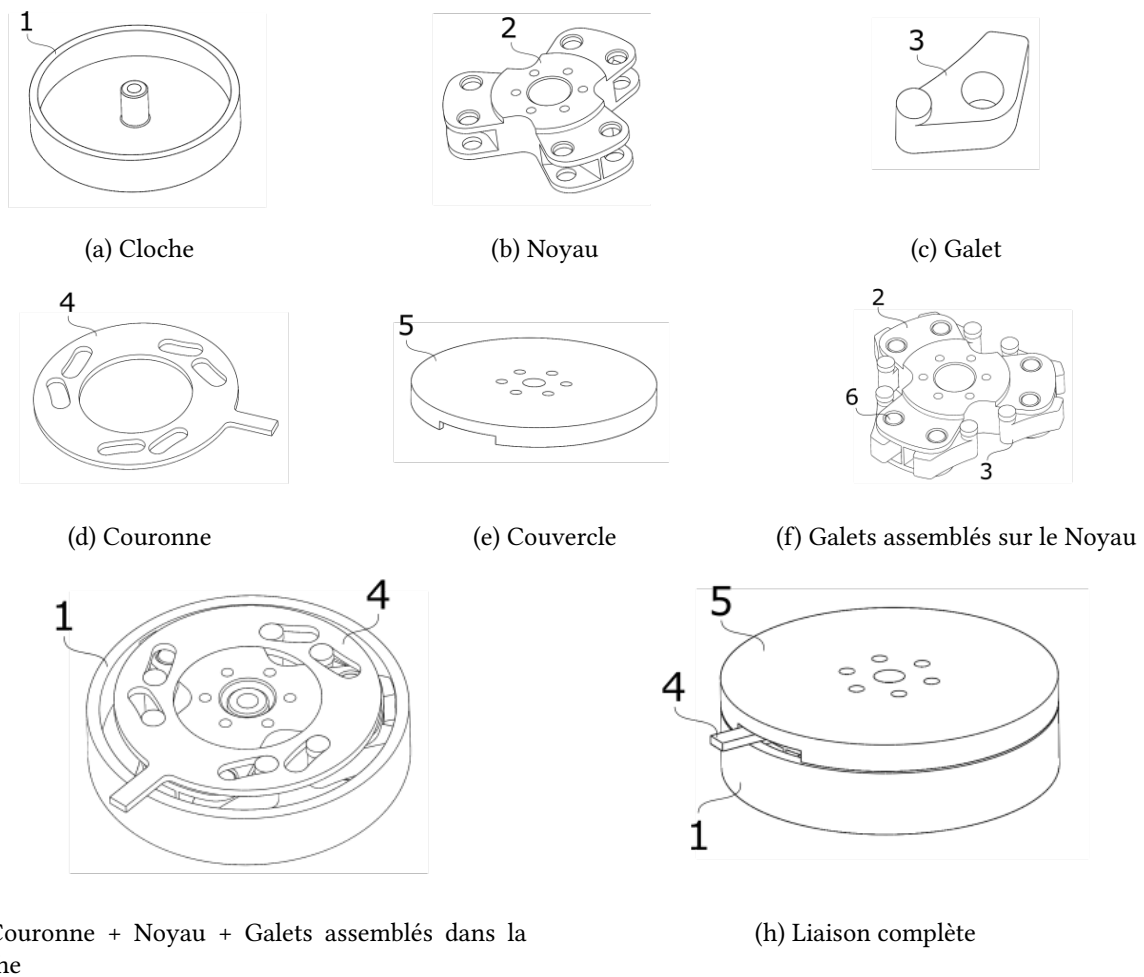
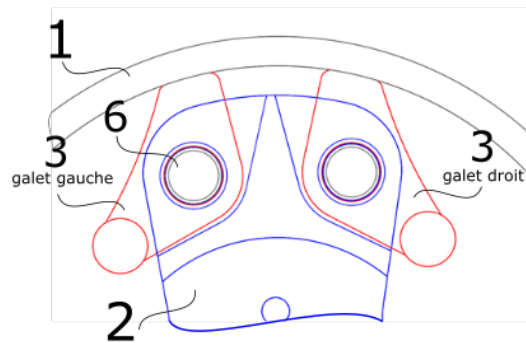


FIGURE 4.15 – Composition de la liaison blocante proposée

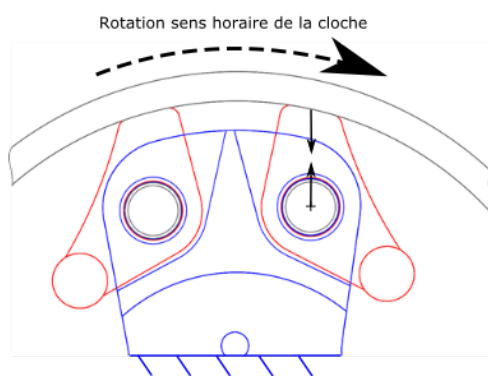
Les rainures de guidage doivent garantir que les galets atteignent leurs positions de blocage. La rotation de la couronne dans le sens horaire rapproche les pions de guidage de l'axe de rotation de la couronne, ce qui entraîne en rotation les galets et les place en mode frottant (Fig. 4.17b). La rotation de la couronne dans le sens anti-horaire écarte les pions de guidage de l'axe de rotation de la couronne, ce qui entraîne en rotation les galets et les place en mode non-frottant (Fig. 4.17a). Ces sens de rotation sont arbitraires et dépendent directement des courbures des rainures. Il suffit alors d'inverser le sens des courbures pour inverser les sens d'actionnement.

Pour bloquer la liaison en mode frottant, la géométrie du mécanisme doit respecter les conditions d'arc-broutement. La direction de l'effort de contact $F_{cloche \rightarrow galet}$ entre chaque *galet* et la *cloche* doit rester incluse dans le cône de frottement respectif (Fig. 4.18a).

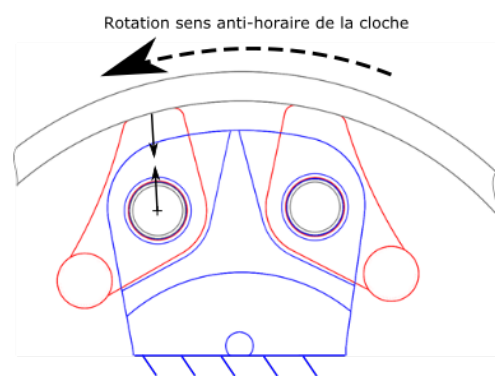
L'actionnement est réalisé par la rotation de la *couronne* autour du *noyau*. Chaque *galet* étant en liaison pivot avec le *noyau*, la liaison ponctuelle qui les relie à la couronne les entraîne en rotation. Le profil des rainures de la *couronne* est tel qu'en position frottant, la courbe est tangente à la rotation de la *couronne* (Fig. 4.18b). Ainsi, la direction de l'effort de réaction du galet sur la *couronne* $F_{galet \rightarrow couronne}$ est sécant avec l'axe de rotation de la *couronne*. Cet effort ne peut donc pas générer de couple sur la *couronne*, rendant le mécanisme irréversible par construction. De plus, en plaçant l'axe de rotation du



(a) Mise en place des galets 3 dans le noyaux 2 et maintien par les axes 6 pour assurer le blocage avec la cloche 1.

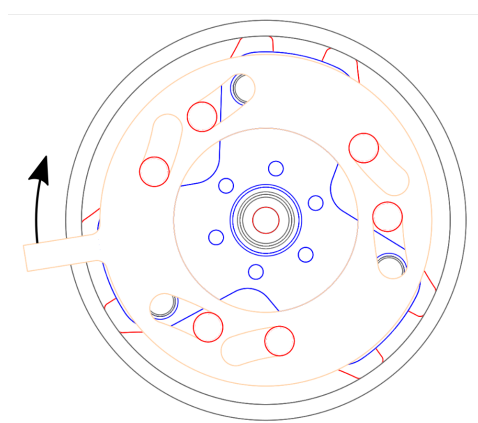


(b) Transmission de l'effort de blocage par le galet droit

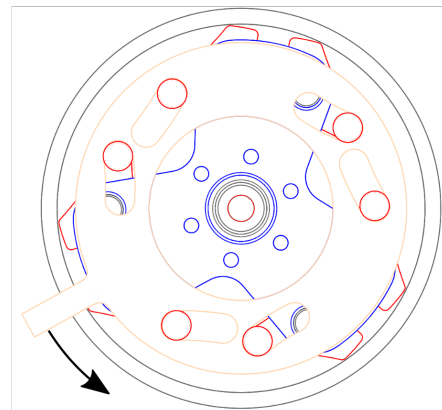


(c) Transmission de l'effort de blocage par le galet gauche

FIGURE 4.16 – Représentation et fonctionnement des galets montés en opposition



(a) Liaison bloquée, galets en position frottant

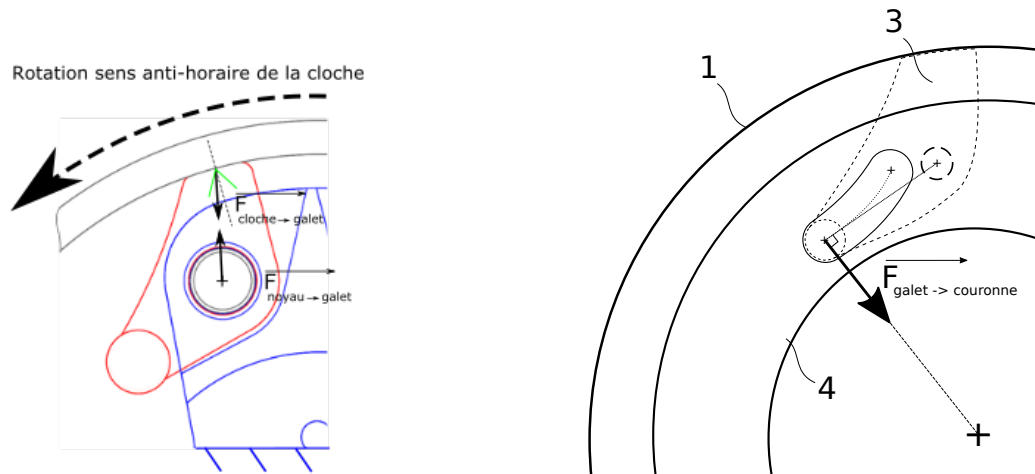


(b) Liaison libre, galets en position non-frottant

FIGURE 4.17 – Positions de fonctionnement des galets

galet sur cette même tangente, l'effort transmis par la couronne aux galets $F_{couronne \rightarrow galet}$ est tangent à la rotation du galet et génère donc un couple pur (Fig. 4.18b).

L'actionnement consiste en une rotation de la couronne par rapport au noyau, et peut être obtenu



(a) Condition d'arc-boutement dans un sens de rotation. Le cône vert représente le cône de frottement entre la *cloche* et le *galet* représenté

(b) Propriétés de tangence de la courbe de guidage des *galets* dans la *couronne* et position de l'axe de rotation des *galets* en position proche du blocage

FIGURE 4.18 – Conditions géométriques du concept de liaison blocante

avec un un moteur électrique piloté en couple ou en position, ou bien par un solénoïde couplé à un bras de levier.

4.1.4 Dimensionnement de la liaison bloquante

4.1.4.1 Paramétrisation

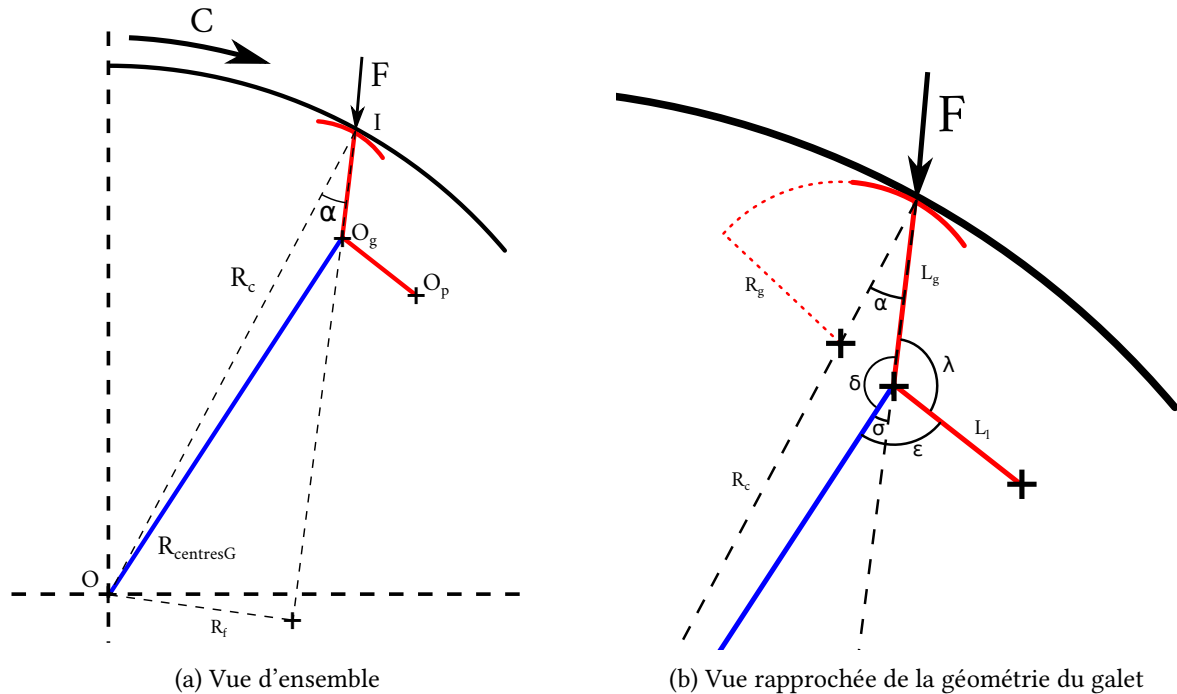


FIGURE 4.19 – Paramétrisation géométrique du mécanisme de blocage par arc-boutement

TABLE 4.3 – Paramètres géométriques du concept de liaison pivot blocante

C	Couple axial à bloquer entre la <i>cloche</i> et le <i>noyau</i>
F	Effort résultant $F_{cloche \rightarrow galet}$ sur chaque <i>galet</i> lors du blocage du couple
n	Nombre de paires de <i>galets</i>
α	Angle entre la direction de la résultante de contact F et la normale de contact
R_f	Rayon projeté du couple généré par l'effort F au noyau de centre O
D_c, R_c	Diamètre et rayon intérieur de la <i>cloche</i>
D_g, R_g	Diamètre et rayon de courbure du <i>galet</i> au point de contact I avec la <i>cloche</i>
$D_{centresG}, R_{centresG}$	Diamètre et rayon du cercle de centre O contenant les centres de rotation des <i>galets</i> O_g
$P_{centresG}$	Périmètre du cercle de diamètre $D_{centresG}$
D_{axes}	Diamètre des <i>axes</i> de guidage des <i>galets</i> dans le <i>noyau</i>
L_g	Distance entre l'axe de rotation du <i>galet</i> O_g et son point de contact avec la <i>cloche</i> I
L_l	Distance entre l'axe de rotation du <i>galet</i> O_g et le centre du pion de guidage du <i>galet</i> O_p
$\delta, \epsilon, \sigma, \lambda$	Angles de construction géométrique du <i>galet</i>
e_g	Épaisseur des <i>galets</i>
b_g	La demi-largeur de contact entre la <i>galet</i> et la <i>cloche</i>

4.1.4.2 Conditions d'arc-boutement

Le blocage mécanique de la liaison repose sur l'arc-boutement des galets sur la cloche. Comme présenté précédemment, une condition sur la direction de l'effort est nécessaire.

Avec f le coefficient de frottement entre le galet et la cloche, on en déduit le demi-angle du cône de frottement $\phi = \arctan(f)$. Dans ce cas, la condition géométrique garantissant l'arc-boutement est :

$$\alpha < \phi \quad (4.4)$$

4.1.4.3 Pressions de contact

La théorie des contacts de Hertz intervient à deux endroits dans ce concept de roue libre : au contact du *galet* avec la *cloche* I ainsi qu'au guidage des *galets* dans le *noyau* O_g .

Dans un premier temps, nous déterminons l'effort F exercé aux n paires de galets lorsque le couple C est appliqué à la liaison bloquée :

$$F = \frac{C}{n * R_c * \sin(\alpha)} \quad (4.5)$$

La théorie de Hertz s'applique pour un effort normal aux surfaces de contacts. Ce n'est pas le cas ici, mais nous supposons α suffisamment faible pour considérer que l'effort de contact normal est égal à F .

En injectant l'Equ. 4.2 dans l'Equ. 4.1, on en déduit une formule permettant de calculer l'épaisseur de galet e_g minimale garantissant des pressions de contact inférieures aux limites des matériaux utilisés :

$$e_g = \frac{2F(\frac{1}{D_g} - \frac{1}{D_c})}{\pi \min(Pmax_g, Pmax_c) (\frac{1}{E_g} + \frac{1}{E_c^*})} \quad (4.6)$$

avec $(Pmax_g, E_g^*)$ et $(Pmax_c, E_c^*)$ la pression maximale admissible et le module d'élasticité modifié (Equ. 4.1) pour respectivement les *galets* et la *cloche*.

On détermine ensuite la demi-largeur de contact b_g entre les *galets* et la *cloche* à partir de l'Equ. 4.2 :

$$b_g = \frac{2.F}{\pi.L.\min(Pmax_g, Pmax_c)} \quad (4.7)$$

Le diamètre minimum des axes de guidage des galets est déterminé par l'Equ. 4.3 :

$$D_{axes} = \frac{4.F}{\pi.L.\min(Pmax_g, Pmax_n)} \quad (4.8)$$

Avec $Pmax_n$ la pression maximale admissible du *noyau*.

Une fois les forces de contacts caractérisées, ceci permet de définir la géométrie des différentes pièces du mécanisme. Dans un premier temps, une longueur de galet L_g est choisie arbitrairement et de manière cohérente avec l'encombrement du mécanisme.

On obtient ensuite le diamètre du cercle des centres de rotation des *galets* $D_{centresG}$:

$$D_{centresG} = 2\sqrt{(R_c.\cos(\alpha) - L_g)^2 + (R_c.\sin(\alpha))^2} \quad (4.9)$$

Le dernier paramètre nécessaire pour déterminer la géométrie complète du noyau est l'écartement entre les galets d'une même paire. Il doit être suffisant pour que les galets puissent s'ouvrir et s'écarter de la cloche sans entrer en collision entre eux, au détriment de la longueur de bras le levier pour leur actionnement L_l . A ce stade, la géométrie de la liaison est fixée.

4.1.5 Dimensionnement du prototype de liaison bloquante

Afin de valider le concept de liaison, un prototype a été réalisé. Les caractéristiques initiales de dimensionnement étaient les suivantes :

- $C = 70 N.m$;
- $D_c = 70 mm$;
- $\alpha = 7$, estimé à partir des frottements aluminium / aluminium ;
- $P_{max_g} = P_{max_c} = P_{max_n} = 236 MPa$, correspondant aux propriétés mécaniques de l'aluminium utilisé.

L'Equ. 4.5 permet de déterminer l'effort appliqué à chaque *galet* $F = 5470 N$. Le choix du diamètre de courbure du galet au niveau de la zone de contact avec la cloche est choisis arbitrairement. Pour limiter les pressions de contact, il doit être proche de celui de la cloche. Après plusieurs itérations, nous avons retenu $R_g = 60 mm$.

L'Equ. 4.6 renvoie la valeur minimale de l'épaisseur de galet $e_g = 6,0 mm$, validant les conditions de résistance aux pressions de contact selon la théorie de Hertz.

L'Equ. 4.7 détermine la demi-largeur de contact $b_g = 2,5 mm$, dimensionnant la longueur de la courbure du galet autour de la zone de contact.

Pour le calcul de l'axe de guidage des galets dans le noyau, l'Equ. 4.8 nous donne le diamètre minimum validant les contraintes de pressions de contact. On obtient $D_{axes} = 5 mm$.

La longueur du galet L_g influence la compacité du mécanisme en fixant la distance entre la zone de contact avec la cloche et son axe de rotation. Pour limiter les risques de flambement du galet sous charge, il advient de minimiser cette longueur. Comme compromis entre compacité et actionnement, on choisit $L_g = 10mm$. A cela s'ajoute le choix de la longueur de bras de levier pour l'actionnement du galet, L_l . Une valeur élevée permet d'augmenter le couple transmis par la couronne d'actionnement au galet, mais pénalise la compacité en augmentant le risques de contact entre galets. Pour la suite, nous prenons $L_l = 13mm$.

Dans le cadre de son projet de fin d'études, Yannick Caeiro [178] s'est basé sur le dimensionnement pour concevoir un prototype de liaison. Après avoir modélisé la liaison (Fig. 4.20), une première version a été usinée au sein de SIGMA Clermont. Les mises en plan sont présentées Annexes B.

Un problème lors de conception a entraîné un défaut de fonctionnement. Le prototype n'a pas pu être exploité pour réaliser les tests de caractérisation et validation prévus.

4.2 Conception de la structure d'essai

Un premier prototype, réalisé à partir de profilé aluminium et d'impression 3D filament, nous à permis de valider le concept de la structure et d'ajuster les différents éléments. Il n'est pas dimensionné pour transmettre d'efforts, mais uniquement donner un premier ressenti subjectif sur le confort, le maintien en position et la facilité de mise en place.

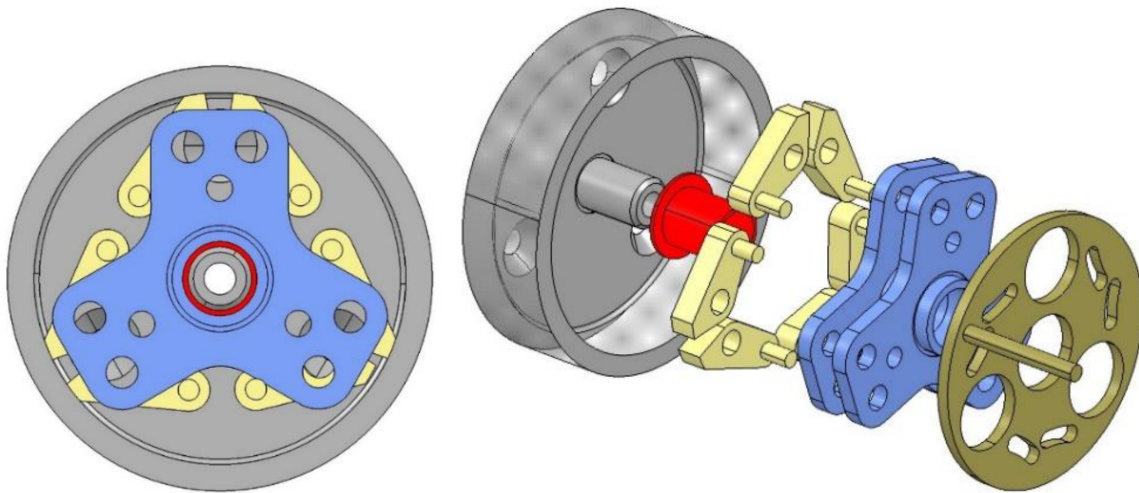


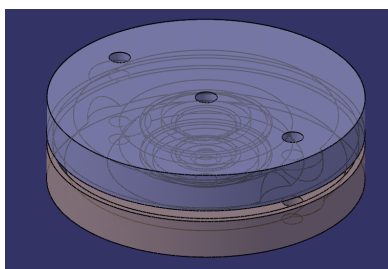
FIGURE 4.20 – Modélisation du prototype de liaison blocante sous Catia V5

La structure est composée de 2 sous-ensembles distincts. Le premier concerne les segments reliés aux liaisons blocantes (équivalentes à de simples liaisons pivots ici). Le second correspond aux éléments de fixations de l'exosquelette sur son porteur.

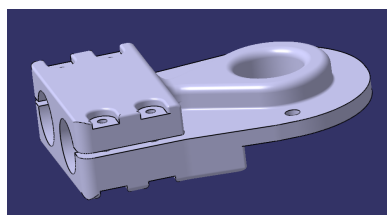
4.2.1 Prototypage de la structure exosquelette

Pour respecter les conditions de fonctionnement et la compatibilité avec le porteur, des dimensions structurelles ont été établies lors du processus de formalisation du concept.

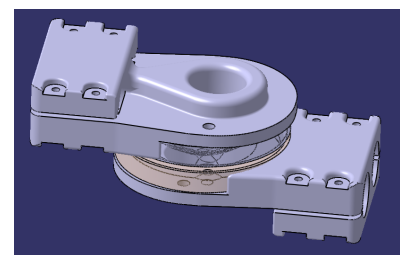
Chaque segment est réalisée à partir de deux tubes en aluminium. Les liaisons blocantes sont remplacées par des liaisons pivots libres dont les dimensions correspondent aux cahier des charges (Fig. 4.21a). Une pièce d'interface (Fig. 4.21b), fixée sur le profilé, permet de le relier aux liaisons blocantes. Cette interface est réalisée en impression 3D, par dépôt de filament (FDM).



(a) Liaison pivot



(b) Interface liaison/segment



(c) Assemblage de deux interfaces sur leur liaison, réalisant la liaison pivot complète

FIGURE 4.21 – Modélisation des pièces de la structure de l'exosquelette

Les liaisons porteur/exosquelette sont constituées de surfaces recouvertes de mousse. Pour la liaison le bras LI_1 , la liaison linéaire-annulaire est obtenue par un support long dont la mousse épaisse et souple permet un déplacement du bras dans la liaison le long de son axe longitudinal, ainsi que les rotations. Au niveau de l'avant-bras, la liaisons équivalente LI_2 recherchée est une liaison pivot de même axe que l'avant-bras. Pour cela, l'exosquelette est fixé au travers de deux centrages courts équivalents à des

rotules, l'un proche du poignet et l'autre proche du coude. Le prototype complet est présenté Figure 4.22.

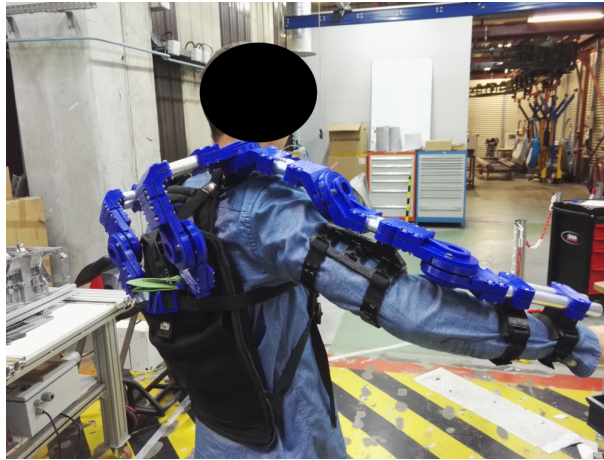


FIGURE 4.22 – Photo du prototype porté

Le positionnement des liaisons d'interaction est ajustable, et la longueur des segments peut être modifiée rapidement en changeant les tubes correspondants. Des tests subjectifs rapides menés sur plusieurs personnes avec des gabarits variés ont été concluants, avec un confort agréable et une bonne liberté de mouvements dans l'espace de travail.

4.3 Conclusions de la partie expérimentale

Le concept d'exosquelette proposé repose sur la rigidification rapide d'une structure portée, capable de transmettre des efforts importants depuis les avant-bras exosquelette au buste de son porteur. Pour cela, neuf liaisons quasi-passives sont nécessaires. Pour un encombrement et un poids limités, elles doivent assurer une liaison pivot et bloquer ce DDL sur commande pour transmettre des couples importants. Les systèmes de blocage en rotation sont nombreux, mais bien trop lourds ou contraignants pour une utilisation portative. Un mécanisme couramment utilisé se démarque, les systèmes de roue libre. Ils offrent un rapport "poids/couple bloqué" avantageux, pour un faible encombrement. Majoritairement mono-directionnels, certains sont capables de bloquer la rotation dans les deux sens de rotation au travers d'un mécanisme d'actionnement manuel.

Pour répondre aux besoins, nous proposons un concept adapté de la roue libre bi-directionnelle. Le couple important que la liaison doit transmettre lors de son blocage génère des pressions de contact trop élevées pour les rouleaux cylindriques ou coniques communément utilisés. Leur rayon de courbure faible est nécessaire à leur mobilité dans le mécanisme, et nous proposons de les remplacer par des galets guidés en rotation et pilotés simultanément par une couronne. Les rayons de courbures des surfaces en contact sont choisis proches, réduisant les pressions de contact. Plusieurs conditions sur la géométrie des galets et leur contrôle rend le mécanisme irréversible, et ne nécessite un apport en énergie que lors du changement d'état entre frottant et non-frottant. La liaison ainsi obtenue peut être bloquée quelle que soit sa position, et transmettre un couple important dans les deux sens de rotation pour un encombrement faible. Un brevet de la liaison complète a été déposé [P3]. Un premier prototype a été réalisé dans le cadre d'un projet de fin d'étude, dont l'objectif était de caractériser le système dimensionné. Cependant, un défaut de conception n'a pas permis de mener les tests de validation prévus.

Un premier prototype de structure a également été réalisé. Composé de profilés tubulaires en aluminium et pièces imprimées en 3D par dépôt de filament, son dimensionnement ne lui permet pas de transmettre les efforts initiaux et les liaisons sont laissées libres uniquement. Son objectif est de tester la perception et la transparence du port d'une telle structure lors des tâches annexes à celle nécessitant l'assistance. Les liaisons d'interaction entre exosquelette et porteur permettent, au travers de la mousse qui les recouvre et de leur positionnement sur les membres, de garantir les DDL nécessaires pour éviter tout blocage lors des mouvements. Les essais subjectifs rapides menés sur plusieurs personnes ont validé le confort et la transparence de la structure lors de son port hors assistance.

Conclusions et perspectives

Cette thèse présente les travaux réalisés sur Les travaux présentés dans cette thèse portent la formalisation et la conception d'exosquelettes destinés à assister les opérateurs sur les lignes de production manufacturières. Un exosquelette est un système mécanique ou robotique d'assistance physique portable, qui suit les membres du porteur sur lequel il est équipé. Son rôle est de réduire la charge physique de son porteur, sans pour autant perturber sa dextérité où le processus industriel dans lequel il est intégré. Dans notre cas, le contexte industriel est celui du secteur automobile du groupe PSA, au sein duquel sont appliqués nos travaux.

Le premier chapitre présente l'environnement manufacturier automobile, secteur sous tension et soumis à une forte concurrence. Les outils de production sont en constante amélioration, et doivent se renouveler sans cesse. Cette évolution ne doit pas se faire au détriment de la santé des opérateurs qui ont un rôle crucial sur les lignes de fabrication des usines terminales. Pourtant, les troubles musculo-squelettiques, représentent encore 78 % des maladies professionnelles déclarée pour le Groupe PSA en 2016. Ils concernent en grande majorité les membres supérieurs, et leur détection et prévention repose sur plusieurs normes pour l'évaluation de la charge physique et l'agencement de l'environnement de travail (NF X35-109, NF EN 1005, NF EN ISO 14738).

En décrivant les différents métiers liés à la production automobile, nous montrons la diversité d'environnements et de postes qui sont impactés. La ligne de Montage reste de loin la plus manuelle, avec en moyenne plus de la moitié de la masse salariale d'une usine de production. Mais il apparaît que les solutions d'assistances usuelles, comme les bras manipulateurs de charges, sont parfois limitées par les contraintes des moyens de production. Les exosquelettes ont alors montré un intérêt en proposant des dispositifs d'assistance lorsqu'aucune autre solution n'est envisageable. Cependant, ces équipements sont encore peu répandus, et il est parfois difficile de leur associer des cas d'usages. Pour faciliter cette phase d'identification des besoins, nous avons proposé une classification des cas d'usages potentiels en trois catégories. Chacune d'entre elles repose sur une problématique commune à de nombreux postes manuels :

- CU_1 : Maintien postural et assistance au mouvement
- CU_2 : Port/manutention de charges lourdes
- CU_3 : Application d'efforts d'assemblage

Avec l'aide de cette classification, il sera possible d'adresser des exosquelettes sur plusieurs postes dont le besoin en assistance est similaire, accélérant ainsi le déploiement. Il apparaît également que de nombreux autres secteurs peuvent bénéficier de ce type d'assistance dont les problématiques et environnements varient sensiblement.

Le deuxième chapitre présente un état de l'art détaillé des exosquelettes destinés à une utilisation industrielle. Ils connaissent aujourd'hui un essor motivés par les secteurs du médical et du militaire. En regroupant les exosquelettes par fonctionnement nous mettons en évidence que malgré des usages variés, des axes de conception sont observables. Nous en présentons cinq principaux : génération de couple au niveau de la hanche, génération de couple à l'articulation du genou, génération d'un effort d'assistance à l'épaule, les dispositifs à compensation de charge, les dispositifs capables de générer un effort à l'environnement, et les exosquelettes multi-assistances possédant plusieurs des propriétés précédentes. Quelle que soit l'application, trois type d'actionnements sont aujourd'hui mis en oeuvre :

- Passifs, ils reposent sur la le stockage et la redistribution d'énergie mécanique au travers de composants tels que les ressorts ;
- Quasi-passifs, ils permettent de contrôler le coefficient de friction d'un ou plusieurs DDL. Les embrayage sont un exemple ;
- Actifs, ils génèrent un effort à partir d'une source d'énergie extérieure. Les moteurs électriques ou hydrauliques sont les plus couramment utilisés.

Dans un objectif de standardisation de la représentation structurale des exosquelettes, nous utilisons une schématisation issue de la robotique. Elle met en évidence les segments rigides, les parties responsables de l'assistance ainsi que les liaisons d'interaction avec le corps du porteur. Il est ainsi possible de comparer structurellement les exosquelettes destinés à un même usage, dans le but ensuite de sélectionner le plus adapté. Afin de faciliter le choix des exosquelettes disponibles pour répondre au besoin identifié, nous proposons une classification de 75 dispositifs identifiés pour une utilisation industrielle. Cette liste permet d'en comparer les propriétés technologiques, et de mettre en parallèle les cas d'usages auxquels ils sont destinés. Une différenciation est faite entre les exosquelettes disponibles sur le marché et ceux encore en développement. Par ce classement, nous mettons en évidence que les exosquelettes majoritairement utilisés aujourd'hui sont passifs, et que les cas d'usages les plus représentés concernent le maintien de posture/aide au mouvement et le port de charge. Cela est principalement dû au fait que cette problématique résolue concerne essentiellement la compensation de poids, dont la direction est verticale et constante dans le temps. Des systèmes mécaniques précontraints sont adaptés à cette problématique, même si la versatilité est encore limitée. Les cas d'application nécessitant l'assistance pour des efforts de direction variable sont eux sous-représentés, car beaucoup plus complexes et nécessitant un plus grande adaptabilité. La recherche est à l'écoute du marché et tend vers le développement d'assistances actives, plus versatiles mais dont les verrous technologiques sont encore un frein à l'utilisation industrielle.

L'objet des travaux de cette thèse est d'apporter une solution d'assistance pour répondre à cette problématique qui aujourd'hui n'a pas de solution adaptée. A partir d'une liste de besoins catégorisés comme CU_3 fournie par les ergonomes, nous avons finalement retenu le poste de pose des garnitures de portes. Il est représentatif de cette problématiques nécessitant un besoin d'assistance en effort frontal, ponctuel et répété. Les contraintes liées à la zone de travail, en terme d'environnement et de tâches annexes, permettent d'illustrer les conditions difficiles liées à l'utilisation d'assistances proches du corps.

Mais les exosquelettes doivent nécessairement passer par une étape de validation avant toute utilisation longue durée. Dans certains cas très précis, les fournisseurs sont à même de fournir des résultats de tests. Mais pour la majorité, les cas d'usages et surtout les tâches annexes restent spécifiques et une validation interne est obligatoire. Nous présentons les méthodologies et moyens disponibles permettant de conduire ces tests à courts et moyen terme. Des protocoles progressifs sont associés à des outils de mesure objectifs et subjectifs. Ils sont chronophages, coûteux et requièrent une expertise spécifique lors

des mesures physiologiques. Un suivi sur le long terme est également indispensable. En effet, les variations entre individus sont difficilement anticipables et même si l'apport en terme d'assistance physique est prouvé, des effets néfastes peuvent toujours apparaître.

Le chapitre 3 est consacré à la formalisation du problème de conception d'un exosquelette destiné à l'industrie, découpée en étapes associées à un ensemble de règles :

- A partir de retours d'expériences et d'observations issus de tests menés sur des dispositifs existant, nous listons et classons 28 règles de conceptions. Elles illustrent les propriétés attendues et nécessaires à un exosquelette pour être adapté à une utilisation en environnement de production industriel. Ces règles sont classées dans cinq catégories permettant d'identifier la pertinence d'un exosquelette : *l'impact, l'appropriation, l'utilité, l'utilisabilité, la sécurité*.
- Nous avons ensuite intégré ces règles de conception à huit étapes clés permettant, à partir de la spécification du besoin, d'aboutir à un concept d'exosquelette pertinent et adapté. Pour chaque étape, les enjeux sont présentés ainsi que les solutions disponibles répondant aux contraintes listées précédemment.

L'originalité de cette démarche réside dans le fait qu'elle offre un visuel sur les différentes orientations possibles lors des phases critiques impliquant des choix conceptuels. Les étapes sont présentées successivement, mais des boucles de retour sont possibles lorsque le concept aboutit à une impasse technologique. Le concept qui découle de cette formalisation peut ensuite être conçu et testé. Cette formalisation limite ainsi les nombreuses itérations nécessaires pour cette technologie qui possède encore peu de retours d'utilisateurs.

Le déroulé de la méthode et les règles énoncées sont appliquées étapes par étape à notre cas d'étude. Ceci aboutit à un concept innovant d'exosquelette valorisé par un dépôt de brevet. Il est composé d'une structure liée aux membres supérieurs et de liaisons pivot blocantes. La structure suit les mouvements de manière transparente dans l'espace de travail. Lors de la phase d'assistance, les liaisons quasi-passives bloquent leur DDL en rotation et rigidifient la structure. Les efforts alors normalement exercés par les bras du porteur sont transférés directement sur le buste. Le concept ainsi obtenu valide les pré-requis nécessaire à une utilisation industrielle.

Le quatrième chapitre détaille les concepts et solutions techniques retenues dans le développement d'un exosquelette pour l'assistance à la pose des garnitures de portes. Le besoin d'une liaison pivot quasi-passive, capable de bloquer un couple élevé sur commande quelque soit sa position, a d'abord été exprimé. La résolution de ce verrou technologique a conduit à la proposition d'un mécanisme innovant, issu de la roue libre, qui a aboutit au dépôt d'un brevet. Le guidage en rotation est assuré par un palier lisse, tandis que le blocage en rotation est réalisé par arc-boutement. Des galets, assemblés par paire en opposition pour garantir un blocage bi-directionnel, sont pilotés simultanément et s'interposent dans les parties mobiles de la liaison pour en bloquer la rotation. Des contraintes géométriques sur la position et le contrôle des galets permettent d'assurer l'irréversibilité du mécanisme lors du blocage, limitant l'apport nécessaire en énergie. Son faible encombrement, et son rapport "poids/couple blocable" en font un actionneur adapté aux besoins identifiés.

La conception et la réalisation d'une structure non actionnée de l'exosquelette a permis de réaliser les premiers tests subjectifs sur le confort et la liberté de mouvement. Nous l'avons réalisé en impression 3D par dépôt de filament pour les pièces structurelles, les segments ont été obtenues à partir de tubes en aluminium. Le résultat final permet d'appréhender l'encombrement et le positionnement des segments sur le corps.

Les contributions principales de la thèse sont synthétisées par :

- Une description approfondie des besoins et attentes du secteur industriel automobile en termes d'assistances physique type exosquelettes ;
- La proposition d'une représentation structurelle des exosquelettes rigides ;
- Un état de l'art et une classification détaillés des exosquelettes destinés à une utilisation industrielle ;
- La formalisation d'une démarche de développement d'un concept d'exosquelette prenant en compte les contraintes du secteur industriel sous forme de règles de conception ;
- Un brevet "Exosquelette d'assistance des membres supérieurs pour l'application d'effort d'assemblage"
- La réalisation d'un prototype de structure exosquelette, qui a permis de réaliser les premiers tests subjectifs de confort et liberté de mouvements ;
- Un brevet "Bloqueur rotatif bidirectionnel pilotable par arc-boutement" ;
- La fabrication d'un prototype de liaison blocante.

Les travaux de cette thèse permettent de clarifier les attentes et par conséquent faciliter la proposition de nouveaux concepts exosquelettes pertinents. Ils ont abouti à une conférence internationale, deux dépôts de brevets et une publication OpenAccess dans une revue internationale est en cours.

Perspectives

Une première perspective consistera au développement d'un indicateur numérique, basé sur les besoins et les propriétés structurales des exosquelette. Il permettra de faciliter la sélection en proposant un indicateur comparatif pour les exosquelettes destinés au même cas d'usages mais dont la structure diffère. Le nombre d'actionneurs, leur type, les zones du corps concernées ou les liaisons d'interaction sont autant de critères qui pourront y être intégrés. Le but étant qu'il soit accessible et puisse être mis en oeuvre par des personnes possédant des connaissances techniques limitées.

Une deuxième perspectives concernera la formalisation du problème de conception. De nouvelles règles de conception pourront être formalisées, au fur et à mesure des nouveaux essais et retours d'expérience. Aussi, de nouvelles étapes pourront également être ajoutées afin d'élargir le spectre de conception à d'autres domaines.

Une troisième perspective suite à ces travaux va consister à optimiser la déformation de la structure de l'exosquelette. Dans le cadre d'une structure rigide, sa déformation en fonctionnement peut s'avérer néfaste. Sous charge, le déplacement des axes des liaisons ou plus directement les efforts induits au porteur par les liaisons d'interaction doivent être minimisés. L'objectif d'une structure rigide conduit à l'ajout de matière ou à l'utilisation de matériaux onéreux. Hors, certains exosquelettes peuvent tout à fait autoriser la déformation de sa structure tant qu'elle n'induit pas d'efforts néfastes ou destructeurs à son intégrité. En connaissant les conditions aux limites de l'assistance, c'est à dire les efforts d'assistance générés et la structure par laquelle ils transitent, il est alors possible d'en déduire un modèle de raideur. Les déplacements des tissus mous induits au niveau des liaisons d'interaction sont directement corrélés aux efforts transmis par l'exosquelette à son porteur. A partir de la position de ces liaisons, il serait alors possible d'optimiser les différentes raideurs de la structure pour les minimiser tout en garantissant son fonctionnement et en limitant les efforts transmis au porteur. Une quatrième perspective concernera la réalisation d'une nouvelle version du prototype de liaison bloquante. Il permettra d'en caractériser la rigidité, pour ensuite l'intégrer dans le modèle de raideur global de la structure. Couplé à des tests de fatigue, ils garantiront une répétabilité de blocage suffisante au regard du temps de fonctionnement recherché. Afin de piloter cette liaison, l'actionneur devra fournir un effort au blocage et au déblocage. Le phénomène d'arc-boutement pourrait générer un effort de résistance important, et le déblocage nécessiter un actionneur puissant. Un servo-moteur contrôlé en position ou un moteur contrôlé en couple possédant un fort taux de réduction semblent adaptés. Intégrés à la liaison, ils pourraient agir directement sur la couronne et piloter ainsi la position des galets entre frottant et non-frottant.

Une dernière perspective consiste au développement de la détection de la phase d'assistance, permettant de commander le blocage des liaisons quasi-passives. Une première approche pourra utiliser l'activité musculaire. Des capteurs placés sur les muscles des bras et avant-bras détectera la contrainte des bras, pour que la structure de l'exosquelette se rigidifie et reprenne les sollicitations mécaniques. Une autre approche consiste à utiliser les vitesses et positions de la structure. Des centrales inertielles placées sur les segments de l'exosquelette permettront d'identifier l'intention de mouvement du porteur, pour ensuite en déduire la phase d'assistance optimale. Cette solution à l'avantage de ne pas rajouter d'équipement sur le porteur.

Liste des publications

[P1] A. Voilque, J. Masood, Jc. Fauroux, L. Sabourin, and O. Guezet, 'Industrial Exoskeleton Technology : Classification, Structural Analysis, and Structural Complexity Indicator', in 2019 Wearable Robotics Association Conference (WearRAcon), Scottsdale, AZ, USA, 2019, pp. 13–20, doi : 10.1109/WEARRA-CON.2019.8719395.

[P2] Brevet N°2002391 : *“Dispositif d’assistance à l’effort de type exosquelette”*, déposée le 10.03.2020

[P3] Brevet N°2006813 : *“Dispositif d’articulation blocable et dispositif d’assistance à l’effort comportant un tel dispositif”*, déposée le 29.06.2020

Bibliographie

- [1] Les tms, inrs. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.inrs.fr/risques/tms-troubles-musculosquelettiques/statistiques.html>
- [2] Les tms : définition et impact. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.ameli.fr/hauts-de-seine/entreprise/sante-travail/risques/troubles-musculosquelettiques-tms/tms-definition-impact>
- [3] B-temia. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.b-temia.com/home-medical-equipment/>
- [4] J. Masood, A. Dacal-Nieto, V. Alonso-Ramos, M. I. Fontano, A. Voilqué, and J. Bou, “Industrial Wearable Exoskeletons and Exosuits Assessment Process,” in *Wearable Robotics : Challenges and Trends*, ser. Biosystems & Biorobotics, M. C. Carrozza, S. Micera, and J. L. Pons, Eds. Springer International Publishing, 2019, pp. 234–238.
- [5] Anatomie du membre supérieur. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://corpshumain.ca/muscle_articulation.php
- [6] W. Maurel and D. Thalmann, “Human shoulder modeling including scapulo-thoracic constraint and joint sinus cones,” *Computers & Graphics*, vol. 24, no. 2, pp. 203–218, Apr. 2000.
- [7] J. Lenarcic and M. Stanasic, “A humanoid shoulder complex and the humeral pointing kinematics,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 19, no. 3, pp. 499–506, June 2003.
- [8] F. C. van der Helm, “A finite element musculoskeletal model of the shoulder mechanism,” *Journal of Biomechanics*, vol. 27, no. 5, pp. 551–569, May 1994.
- [9] F. C. Van der Helm, “A three-dimensional model of the shoulder and elbow,” in *First Conference of the International Shoulder Group*. Shaker Publishing BV, Delft, The Netherlands, 1997, pp. 65–70.
- [10] Z. Dvir and N. Berme, “The shoulder complex in elevation of the arm : A mechanism approach,” *Journal of Biomechanics*, vol. 11, no. 5, pp. 219–225, Jan. 1978.
- [11] B. Tondu, “Estimating shoulder-complex mobility,” *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 4, no. 1, pp. 19–29, July 2007.
- [12] N. Jarrasse, G. Morel, and U. Pierre, “Connecting a Human Limb to an Exoskeleton,” p. 13, 2012.
- [13] Frein électro-magnétique, miki pulley. (Jan. 2020). [Online]. Available : https://www.mikipulley.de/wp-content/uploads/2018/09/111_11G-Kombi.pdf
- [14] Embrayage à denture axiale, unicum. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://transmission-puissance.unicum.fr/dyn/composants_industriels/freins_et_embayages/embrayage_electromagnetique/gdf--f.pdf

- [15] H. Hertz, "On the contact of elastic solids," *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, pp. 156–171, 1881.
- [16] "Musculoskeletal disorders and workplace factors. A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back." U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Tech. Rep., July 1997.
- [17] Marché automobile asiatique, mckinsey. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise>
- [18] Industrie 4.0, groupe psa. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.groupe-psa.com/fr/groupe-automobile/performance-industrielle/>
- [19] S. Bevan, "Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe," *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, vol. 29, no. 3, pp. 356–373, June 2015.
- [20] P. S. Bevan, "The Impact of Back Pain on Sickness Absence in Europe," *The work foundation*, p. 8, 2012.
- [21] A. Parent-Thirion, E. Fernández Macías, J. Hurley, and G. Vermeylen, "Fourth European Working Conditions Survey.pdf," European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, Dublin, Tech. Rep., 2007.
- [22] M. Aghilinejad, A. Choobineh, Z. Sadeghi, M. Nouri, and A. B. Ahmadi, "Prevalence of Musculoskeletal Disorders among Iranian Steel Workers," vol. 14, p. 6, 2012.
- [23] E. Habibi and M. Fereidan, "Prevalence of Musculoskeletal Disorders and Associated Lost Work Days in Steel Making Industry," vol. 37, p. 9, 2008.
- [24] A. Shamima, M. M. Z. Uddin, and C. S. Kanti, "Prevalence of musculoskeletal symptoms and associated factors : A cross-sectional study of metal workers in Bangladesh," *Work*, no. 3, pp. 363–370, 2015.
- [25] Rapport rse 2017, groupe psa. (Jan. 2020). [Online]. Available : [file:///C:/Users/U509872/Downloads/Groupe_PSA_Rapport_RSE_2017%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/U509872/Downloads/Groupe_PSA_Rapport_RSE_2017%20(2).pdf)
- [26] "NF X35-109 : Norme Ergonomie, manutention et charge - Afnor Editions." [Online]. Available : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x35-109/ergonomie-manutention-manuelle-de-charge-pour-soulever-deplacer-et-pousser-tirer-methodologie-d-analyse-et-valeurs-seuils/article/653116/fa172358>
- [27] "NF EN 1005-5 - Mai 2007." [Online]. Available : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-1005-5/securete-des-machines-performance-physique-humaine-partie-5-appreciation-du-risque-relatif-a-la-manutention-repetitive-a-frequen/article/716319/fa104409>
- [28] "NF EN ISO 14738 - Novembre 2008." [Online]. Available : <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-iso-14738/securete-des-machines-prescriptions-anthropometriques-relatives-a-la-conception-des-postes-de-travail-sur-les-machines/article/747788/fa157115>
- [29] P. Buckle, J. Devereux, and E. A. for Safety and Health at Work, Eds., *Work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders*, ser. Research / European Agency for Safety and Health at Work. Luxembourg : Office for Official Publ. of the Europ. Communities, 1999, oCLC : 231838964.
- [30] H.-W. Choi, Y.-K. Kim, D.-M. Kang, J.-E. Kim, and B.-Y. Jang, "Characteristics of occupational musculoskeletal disorders of five sectors in service industry between 2004 and 2013," *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 29, no. 1, Dec. 2017.

- [31] 10 idées reçues sur les exosquelettes, inrs. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6295/ed6295.pdf>
- [32] J. Theurel and K. Desbrosses, "Occupational Exoskeletons : Overview of Their Benefits and Limitations in Preventing Work-Related Musculoskeletal Disorders," *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, pp. 1–17, July 2019.
- [33] S. O. Andersen, "Chapter 94 - Exoskeleton," in *Encyclopedia of Insects (Second Edition)*, V. H. Resh and R. T. Cardé, Eds. San Diego : Academic Press, Jan. 2009, pp. 339–342. [Online]. Available : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012374144800103X>
- [34] H. Lee, W. Kim, J. Han, and C. Han, "The technical trend of the exoskeleton robot system for human power assistance," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 8, pp. 1491–1497, Aug. 2012.
- [35] B. J. Makinson, "Research and Development Prototype for Machine Augmentation of Human Strength and Endurance. Hardiman I Project ;," Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, VA, Tech. Rep., May 1971.
- [36] B. R. Fick and J. B. Makinson, "Hardiman I prototype for machine augmentation of human strength and endurance," GENERAL ELECTRIC CO SCHENECTADY NY SPECIALTY MATERIALS HANDLING PRODUCTS OPERATION, Tech. Rep., 1971.
- [37] H. S. Lo and S. Q. Xie, "Exoskeleton robots for upper-limb rehabilitation : State of the art and future prospects," *Medical Engineering & Physics*, vol. 34, no. 3, pp. 261–268, Apr. 2012.
- [38] T. Nef, M. Mihelj, and R. Riener, "ARMin : a robot for patient-cooperative arm therapy," *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 45, no. 9, pp. 887–900, Sept. 2007.
- [39] M. Mihelj, T. Nef, and R. Riener, "ARMin II-7 DoF rehabilitation robot : mechanics and kinematics," in *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 4120–4125.
- [40] E. Pirondini, M. Coscia, S. Marcheschi, G. Roas, F. Salsedo, A. Frisoli, M. Bergamasco, and S. Micera, "Evaluation of the effects of the Arm Light Exoskeleton on movement execution and muscle activities : a pilot study on healthy subjects," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 13, no. 1, Dec. 2016.
- [41] X. Yang, H. She, H. Lu, T. Fukuda, and Y. Shen, "State of the Art : Bipedal Robots for Lower Limb Rehabilitation," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 11, p. 1182, Nov. 2017.
- [42] Alex, kinetek. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.wearable-robotics.com/kinetek/products/alex/>
- [43] T. Gurriet, S. Finet, G. Boeris, A. Duburcq, A. Hereid, O. Harib, M. Masselin, J. Grizzle, and A. D. Ames, "Towards Restoring Locomotion for Paraplegics : Realizing Dynamically Stable Walking on Exoskeletons," p. 8.
- [44] K. L. Mudie, A. C. Boynton, T. Karakolis, M. P. O'Donovan, G. B. Kanagaki, H. P. Crowell, R. K. Begg, M. E. LaFiandra, and D. C. Billing, "Consensus paper on testing and evaluation of military exoskeletons for the dismounted combatant," *Journal of Science and Medicine in Sport*, May 2018.
- [45] Dermosquelette. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://rpdefense.over-blog.com/tag/exosquelette/>
- [46] Uprise, mawashi. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.mawashi.net/fr/exosquelette-tactique-uprise>

- [47] C. Dahmen, C. Hölzel, F. Wöllecke, and C. Constantinescu, "Approach of Optimized Planning Process for Exoskeleton Centered," *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 1277–1282, 2018.
- [48] C. Constantinescu, D. Popescu, P.-C. Muresan, and S.-I. Stana, "Exoskeleton-centered Process Optimization in Advanced Factory Environments," *Procedia CIRP*, vol. 41, pp. 740–745, 2016.
- [49] M. M. Holscher, B. B. Maat, R. Huitema, and B. M. Wisse, "Wearable support structure for at least partly relieving a human body during leaning or bending over," Patent WO2 016 148 566A1, 2016.
- [50] Suitx. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.suitx.com/>
- [51] M. B. Näf, A. S. Koopman, S. Baltrusch, C. Rodriguez-Guerrero, B. Vanderborght, and D. Lefeber, "Passive Back Support Exoskeleton Improves Range of Motion Using Flexible Beams," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, 2018.
- [52] Y.-C. Wu, F.-W. Chen, T.-T. Liao, and C.-T. Chen, "Force reflection in a pneumatic artificial muscle actuated haptic system," *Mechatronics*, vol. 61, pp. 37–48, Aug. 2019.
- [53] Lift-assistance exosuit. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.lowesinnovationlabs.com/exosuits>
- [54] Spexor. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.spexor.eu/>
- [55] UTF8gbsn, H. Kobayashi, and UTF8gbsn , "Thigh lift support device," Patent JP2 017 055 793A, 2017.
- [56] Robo-mate. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.robo-mate.eu/>
- [57] Active trunk, robo-mate. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.robo-mate.eu/active-trunk.html>
- [58] Atoun. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://atoun.co.jp/products>
- [59] Cyberdyne. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.cyberdyne.jp/english/>
- [60] Corfor. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.corfor.fr/>
- [61] Kinetic edge. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://kineticedgeinc.com/>
- [62] M. C. Doyle, "Adaptive arm support systems and methods for use," Patent US20 140 158 839A1, 2013.
- [63] G. N. Genani, "Force-balancing support, mechanical apparatus and wearable support device," Patent WO2 018 073 629A1, 2018.
- [64] Ottobock. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.ottobock.com/en/company/ottobock-industrials/paexo/>
- [65] Tiltamax. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://exoskeletonreport.com/product/armor-man-2/>
- [66] Beijing wiely camera equipment sales co., ltd. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://wiely.diytrade.com/sdp/2295133/4/pd/13045616-2756610/Wiely_steadicam_stabilizer_vest_arm_for_DSLR_came.html
- [67] Exhauss. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://www.exhauss.com/fr_produits.htm
- [68] Lockheed martin. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/industrial.html>
- [69] Power assist glove, gloria mundi care. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://dk.gloriamundicare.com/power-assist-handske.html>

- [70] J. Ingvast, H. H. Von, and J. Wikander, "Strengthening glove," Patent WO2 008 027 002A1, 2008.
- [71] K. Gunura, D. Vafi, R. Jergen, and S. Hutter, "Leg unit for a wearable sitting posture assisting device," Patent WO2 017 191 173A1, 2017.
- [72] Viz-o. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://viz-o.com/>
- [73] Shiva, ergosanté. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://ergosante.fr/2019/04/11/cet-exosquelette-invente-par-ergosante-qui-a-seduit-airbus-helicopters/>
- [74] Hercule, rb3d. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.rb3d.com/en/exoskeletons/>
- [75] Panasonic. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://newatlas.com/panasonic-power-loader-light-exoskeleton/25682/>
- [76] Sarcos. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.sarcos.com/products/guardian-xo/>
- [77] J.-S. Oh and S.-B. Choi, "State of the art of medical devices featuring smart electro-rheological and magneto-rheological fluids," *Journal of King Saud University - Science*, vol. 29, no. 4, pp. 390–400, Oct. 2017.
- [78] Y. Jeong, Y. Lee, K. Kim, Y.-S. Hong, and J.-O. Park, "A 7 DOF wearable robotic arm using pneumatic actuators," in *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, vol. 19, 2001, pp. 388–393.
- [79] N. G. Tsagarakis and D. G. Caldwell, "Development and control of a 'soft-actuated' exoskeleton for use in physiotherapy and training," *Autonomous Robots*, vol. 15, no. 1, pp. 21–33, 2003.
- [80] C. Y. Lau and A. Chai, "The Development of a Low Cost Pneumatic Air Muscle Actuated Anthropomorphic Robotic Hand," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 737–742, 2012.
- [81] G. Gogu, *Structural synthesis of parallel robots. Pt. 1 : Methodology*, ser. Solid mechanics and its applications. Dordrecht : Springer, 2008, no. 149, oCLC : 254636188.
- [82] —, *Translational topologies with two and three degrees of freedom*, ser. Structural synthesis of parallel robots. Dordrecht : Springer, 2009, no. Grigore Gogu ; Pt. 2, oCLC : 552956160.
- [83] A. T. Asbeck, S. M. De Rossi, I. Galiana, Y. Ding, and C. J. Walsh, "Stronger, Smarter, Softer : Next-Generation Wearable Robots," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 21, no. 4, pp. 22–33, Dec. 2014.
- [84] A. T. Asbeck, R. J. Dyer, A. F. Larusson, and C. J. Walsh, "Biologically-inspired soft exosuit," in *2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, June 2013, pp. 1–8, iSSN : 1945-7901, 1945-7898.
- [85] L. N. Awad, J. Bae, K. O'Donnell, S. M. De Rossi, K. Hendron, L. H. Sloop, P. Kudzia, S. Allen, K. G. Holt, T. D. Ellis, and others, "A soft robotic exosuit improves walking in patients after stroke," *Science Translational Medicine*, vol. 9, no. 400, p. eaai9084, 2017.
- [86] J. E. Duarte, K. Schmidt, and R. Riener, "The Myosuit : textile-powered mobility," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 34, pp. 242–243, Jan. 2019.
- [87] L. Cappello, Dinh Khanh Binh, Shih-Cheng Yen, and L. Masia, "Design and preliminary characterization of a soft wearable exoskeleton for upper limb," in *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*. Singapore, Singapore : IEEE, June 2016, pp. 623–630.
- [88] Z. Tang, K. Zhang, S. Sun, Z. Gao, L. Zhang, and Z. Yang, "An Upper-Limb Power-Assist Exoskeleton Using Proportional Myoelectric Control," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 14, no. 4, pp. 6677–6694, Apr. 2014.

- [89] P. Polygerinos, K. C. Galloway, E. Savage, M. Herman, K. O. Donnell, and C. J. Walsh, "Soft robotic glove for hand rehabilitation and task specific training," in *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2015, pp. 2913–2919, iSSN : 1050-4729.
- [90] Projet européen xosoft. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.xosoft.eu/>
- [91] A. Sadeghi, A. Mondini, and B. Mazzolai, "Preliminary Experimental Study on Variable Stiffness Structures Based on Textile Jamming for Wearable Robotics," in *Wearable Robotics : Challenges and Trends*. Springer, Cham, Oct. 2018, pp. 49–52.
- [92] M. Bekki, H. Matsuse, R. Hashida, T. Nago, M. Omoto, and N. Shiba, "The Study on the Effects of Motor-Assisted Gloves (SEM Glove) on Functional Disorders of Fingers," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 98, no. 10, p. e120, Oct. 2017.
- [93] S. L. Nogueira, S. Lambrecht, R. S. Inoue, M. Bortole, A. N. Montagnoli, J. C. Moreno, E. Rocon, M. H. Terra, A. A. G. Siqueira, and J. L. Pons, "Global Kalman filter approaches to estimate absolute angles of lower limb segments," *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 16, no. 1, p. 58, May 2017.
- [94] Y. Ding, I. Galiana, C. Sivi, F. A. Panizzolo, and C. Walsh, "IMU-based iterative control for hip extension assistance with a soft exosuit," in *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2016, pp. 3501–3508.
- [95] M. Totaro, T. Poliero, A. Mondini, C. Lucarotti, G. Cairoli, J. Ortiz, and L. Beccai, "Soft Smart Garments for Lower Limb Joint Position Analysis," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 17, no. 10, Oct. 2017.
- [96] M. Wehner, B. Quinlivan, P. M. Aubin, E. Martinez-Villalpando, M. Baumann, L. Stirling, K. Holt, R. Wood, and C. Walsh, "A lightweight soft exosuit for gait assistance," in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2013, pp. 3362–3369, iSSN : 1050-4729.
- [97] Levitate technologies, inc. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.levitatetech.com/airframe/>
- [98] Archelis. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.archelis.com/>
- [99] Japet. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.japet.eu/>
- [100] B. Damien and N. Antoine, "Vertebral decompression device," Patent US20 180 085 279A1, 2016.
- [101] H. Kazerooni, E. Hacker, L. Chen, W. Tung, N. Poon, and T. Yangyuenthanasan, "Trunk supporting exoskeleton and method of use," Patent WO2 017 086 946A1, 2017.
- [102] Bioservo. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.bioservo.com/>
- [103] Noonee. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.noonee.com/en/>
- [104] German bionic. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.germanbionic.com/en/crayx/>
- [105] Exos, crimson dynamics. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.c-dyn.com/En/?EXOS>
- [106] Ekso bionics. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://eksobionics.com/eksoworks/>
- [107] R. Angold, J. Lubin, M. Solano, C. Paretich, and T. Mastaler, "Exoskeleton and method of providing an assistive torque to an arm of a wearer," Patent US10 058 994B2, 2018.
- [108] Innophys. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://innophys.jp/>
- [109] Strongarm technologies. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.strongarmtech.com/ergo-skeleton>

- [110] S. Petterson, M. Kim, M. Spinelli, K. I. Noh, and T. Bromm, "A postural feedback and support system," Patent WO2 017 100 460A1, 2017.
- [111] K. E. Maxwell, P. A. Aelker, G. A. Barnes, A. J. Bell, R. Brady, E. Holmen, A. Hussain, and J. Charrier, "Exoskeleton system providing for a load transfer when a user is standing and kneeling," Patent US9 808 073B1, 2017.
- [112] Laevo exoskelet. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://en.laevo.nl/>
- [113] Lex, astride bionix. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.dezeen.com/2019/10/17/lex-a-stride-bionix-wearable-exoskeleton-chair/>
- [114] 20kts. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.20knots-plus.com/marine-mojo/>
- [115] Comau. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.comau.com/EN/MATE>
- [116] Necrotech. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.jspsafety.com/link/en/body-ppe/back-neck-knee-supports/necrotech-/ahv330-004-900/p/?parm=CAT1JSP&prdcod=AHV330-004-900>
- [117] Lockheed martin. (Jan. 2020). [Online]. Available : https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/exoskeleton-technologies/military.html?cq_ck=1522941066947
- [118] E. L. Van and H. Kazerooni, "Apparatus for human arm supporting exoskeleton," Patent US9 889 554B2, 2016.
- [119] Skel'ex. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://skel-ex.com/>
- [120] J. L. H. Sean Michael PETERSON, "Self-activated lifting vest with sensory-feedback and methods of use thereof," Patent WO2 014 160 693A1, 2014.
- [121] UTF8gbsn and UTF8gbsn, "Exoskeleton," Patent CN205 908 976U, 2017.
- [122] Active arms, robo-mate. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.robo-mate.eu/active-arms.html>
- [123] Exo back, rb3d. (Jan. 2020). [Online]. Available : https://www.linkedin.com/posts/thierry-rolland_low-musculoskeletal-ergonomy-activity-6603301091457273856-EPVF
- [124] Fraunhofer-gesellschaft, future work lab. (Jan. 2020). [Online]. Available : https://futureworklab.de/en/demonstrator-environment.html#faqitem_0-answer
- [125] Hexar systems. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://www.hexarsystems.com/new/product/product_p0\4.php?p_idx=3
- [126] Hulc. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.army-technology.com/projects/human-universal-load-carrier-hulc/>
- [127] Honda. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://global.honda/products/power/walkingassist.html>
- [128] Passive arms, robo-mate. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.robo-mate.eu/passive-arms.html>
- [129] Panasonic. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://news.panasonic.com/global/stories/2016/44969.html>
- [130] Y. Giovanelli, "Dispositif d'assistance physique pour lutter contre les tms. approche pluridisciplinaire dans un projet de conception en open innovation," *35ème congrès de médecine du travail*, 2018.
- [131] Harvard biodesign lab. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://biodesign.seas.harvard.edu/soft-exosuits>

- [132] Superflex. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.sri.com/sites/default/files/brochures/superflex.pdf>
- [133] M. J. Cromie, K. G. Whitterspoon, M. Grant, N. I. Kernbaum, R. Mahoney, M. L. Tayson-Frederick, L. C. Fielding, V. Riggs, E. Shahoian, and M. E. Hogue, "Systems and methods for assistive exosuit system," Patent WO2 018 039 354A1, 2018.
- [134] D. J. Hyun, K. Bae, K. Kim, S. Nam, and D.-h. Lee, "A light-weight passive upper arm assistive exoskeleton based on multi-linkage spring-energy dissipation mechanism for overhead tasks," *Robotics and Autonomous Systems*, p. 103309, Oct. 2019.
- [135] T. K. Hideo Shimizu, Tatsuya Noda, "Walking assistance device," Patent US8 409 119B2, 2013.
- [136] Raytheon. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.army-technology.com/projects/raytheon-xos-2-exoskeleton-us/>
- [137] M. Sposito, T. Poliero, C. D. Natali, J. Ortiz, C. Pauli, E. Graf, A. D. Eyto, E. Bottenberg, and D. G. Caldwell, "Evaluation of XoSoft Beta-1 Lower Limb Exoskeleton on a Post Stroke patient," p. 5, 2018.
- [138] C. Di Natali, T. Poliero, M. Sposito, E. Graf, C. Bauer, C. Pauli, E. Bottenberg, A. De Eyto, L. O'Sullivan, A. F. Hidalgo, D. Scherly, K. S. Stadler, D. G. Caldwell, and J. Ortiz, "Design and Evaluation of a Soft Assistive Lower Limb Exoskeleton," *Robotica*, vol. 37, no. 12, pp. 2014–2034, Dec. 2019.
- [139] N. Sylla, "Contribution à l'assistance robotisée du geste au travail : Modélisation, analyse et assistance du geste," Ph.D. dissertation, UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER 2, Dec. 2014.
- [140] S. Balasubramanian, A. Melendez-Calderon, A. Roby-Brami, and E. Burdet, "On the analysis of movement smoothness," *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, vol. 12, no. 1, Dec. 2015.
- [141] T. Luger, R. Seibt, T. J. Cobb, M. A. Rieger, and B. Steinhilber, "Influence of a passive lower-limb exoskeleton during simulated industrial work tasks on physical load, upper body posture, postural control and discomfort," *Applied Ergonomics*, vol. 80, pp. 152–160, Oct. 2019.
- [142] A. Nag, B. Menzies, and S. Chandra Mukhopadhyay, "Performance analysis of flexible printed sensors for robotic arm applications," *Sensors and Actuators A : Physical*, pp. 226–236, 2018.
- [143] B. Verdier, "On the Use of Pressure Information for Hand Animation," p. 66.
- [144] N. Sylla, V. Bonnet, F. Colledani, and P. Fraisse, "Ergonomic contribution of ABLE exoskeleton in automotive industry," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 44, no. 4, pp. 475–481, July 2014.
- [145] Anybody technology. (Jan. 2020). [Online]. Available : <https://www.anybodytech.com/>
- [146] S. L. Delp, F. C. Anderson, A. S. Arnold, P. Loan, A. Habib, C. T. John, E. Guendelman, and D. G. Thelen, "OpenSim : Open-Source Software to Create and Analyze Dynamic Simulations of Movement," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54, no. 11, pp. 1940–1950, Nov. 2007.
- [147] G. A. V. Borg, *Physical performance and perceived exertion*, ser. Physical performance and perceived exertion. Oxford, England : Univer. Lund, 1962.
- [148] Acquisition et intégration d'un exosquelette en entreprise, inrs. (Jan. 2020). [Online]. Available : <http://www.inrs.fr/dms/inrs/CataloguePapier/ED/TI-ED-6315/ed6315.pdf>
- [149] H. Zhang, "Design of a Passive Exoskeleton Spine," 2014.

- [150] B. K. Dinh, M. Xiloyannis, L. Cappello, C. W. Antuvan, S.-C. Yen, and L. Masia, "Adaptive backlash compensation in upper limb soft wearable exoskeletons," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 92, pp. 173–186, June 2017.
- [151] Z. Huang, N. M. Thalmann, and D. Thalmann, "Interactive Human Motion Control Using a Closed-Form of Direct and Inverse Dynamics," in *Fundamentals of Computer Graphics*. Beijing, China : WORLD SCIENTIFIC, July 1994, pp. 243–255.
- [152] A. Schiele, "An explicit model to predict and interpret constraint force creation in pHRI with exoskeletons," in *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Pasadena, CA, USA : IEEE, May 2008, pp. 1324–1330.
- [153] J.-C. Fauroux, "Synthesis, design, modelling and experimentation of innovative machines - application to agile mobile robots," *Mémoire d'habilitation à diriger les recherches*, pp. 274–276, 2017.
- [154] W. Maurel, "3D modeling of the human upper limb including the biomechanics of joints, muscles and soft tissues," 1999.
- [155] E. Jaspers, H. Feys, H. Bruyninckx, A. Cutti, J. Harlaar, G. Molenaers, and K. Desloovere, "The reliability of upper limb kinematics in children with hemiplegic cerebral palsy," *Gait & Posture*, vol. 33, no. 4, pp. 568–575, Apr. 2011.
- [156] G. Rab, K. Petuskey, and A. Bagley, "A method for determination of upper extremity kinematics," *Gait & Posture*, vol. 15, no. 2, pp. 113–119, Apr. 2002.
- [157] E. ROUX and S. BOUILLAND, "EVALUATION OF THE GO METHOD WITHIN THE UPPER LIMB KINEMATICS ANALYSIS," p. 14, 2002.
- [158] R. Schmidt, C. Disselhorst-Klug, J. Silny, and G. Rau, "A marker-based measurement procedure for unconstrained wrist and elbow motions," *Journal of Biomechanics*, vol. 32, no. 6, pp. 615–621, June 1999.
- [159] E. V. Biryukova, A. Roby-Brami, A. A. Frolov, and M. Mokhtari, "Kinematics of human arm reconstructed from spatial tracking system recordings," *Journal of Biomechanics*, vol. 33, no. 8, pp. 985–995, Aug. 2000.
- [160] V. De Sapio, K. Holzbauer, and O. Khatib, "The control of kinematically constrained shoulder complexes : Physiological and humanoid examples," in *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*. IEEE, 2006, pp. 2952–2959.
- [161] V. De Sapio, J. Warren, and O. Khatib, "Predicting reaching postures using a kinematically constrained shoulder model," *Advances in robot kinematics*, vol. 3, pp. 209–218, 2006.
- [162] R. A. R. CHANDRA, "Development and Control of Upper-Limb Exoskeleton Robots," Ph.D. dissertation, School of Science and Engineering, Saga University, Japan, 2009.
- [163] A. El Habachi, S. Duprey, L. Cheze, and R. Dumas, "A parallel mechanism of the shoulder—application to multi-body optimisation," *Multibody System Dynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 439–451, Apr. 2015.
- [164] A. Ericson, *Elbow kinematics : studies of the elbow joint under normal conditions and after joint replacement*, 2010.
- [165] A. Ericson, A. Arndt, A. Stark, P. Wretenberg, and A. Lundberg, "Variation in the position and orientation of the elbow flexion axis," *The Journal of Bone and Joint Surgery*, vol. 85, no. 4, pp. 538–544, May 2003.

- [166] E. Papadopoulos and G. Patsianis, "Design of an exoskeleton mechanism for the shoulder joint," in *12th IFToMM World Congress, 2007*, pp. 18–21.
- [167] J. Garrido, W. Yu, and A. Soria, "Modular design and modeling of an upper limb exoskeleton," in *Biomedical Robotics and Biomechatronics (2014 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on)*. IEEE, 2014, pp. 508–513.
- [168] J. Rosen, M. Brand, M. B. Fuchs, and M. Arcan, "A myosignal-based powered exoskeleton system," *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics-part A : Systems and humans*, vol. 31, no. 3, pp. 210–222, 2001.
- [169] A. Frisoli, L. Borelli, A. Montagner, S. Marcheschi, C. Procopio, F. Salsedo, M. Bergamasco, M. C. Carboncini, M. Tolaini, and B. Rossi, "Arm rehabilitation with a robotic exoskeleton in Virtual Reality," in *Rehabilitation Robotics, 2007. ICORR 2007. IEEE 10th International Conference on*. IEEE, 2007, pp. 631–642.
- [170] G. R. Johnson, D. A. Carus, G. Parrini, S. Marchese, and R. Vleggi, "The design of a five-degree-of-freedom powered orthosis for the upper limb," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H : Journal of Engineering in Medicine*, vol. 215, no. 3, pp. 275–284, Mar. 2001.
- [171] V. Grecu, N. Dumitru, and L. Grecu, "A Numerical Approach for Modeling the Human Upper Limb," *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol. 2, 2009.
- [172] J. C. Perry, J. Rosen, and S. Burns, "Upper-Limb Powered Exoskeleton Design," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 12, no. 4, pp. 408–417, Aug. 2007.
- [173] P. Garrec, "Design of an anthropomorphic upper limb exoskeleton actuated by ball-screws and cables," *Bulletin of the Academy of Sciences of the Ussr-Physical Series*, vol. 72, no. 2, p. 23, 2010.
- [174] A. Gupta and M. O'Malley, "Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 11, no. 3, pp. 280–289, June 2006.
- [175] N. Jarassé, "Contributions à l'exploitation d'exosquelettes actifs pour la rééducation neuromotrice," Ph.D. dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2010.
- [176] R. S. Hartenberg and J. Denavit, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices," Jan. 1955.
- [177] Embrayage mutli-disques, unicum. (Jan. 2020). [Online]. Available : http://transmission-puissance.unicum.fr/dyn/composants_industriels/freins_et_embayages/embrayage_electromagnetique/glr.pdf
- [178] Y. Caeiro, "Conception et fabrication d'une liaison électro-mécanique pour exo-squelette innovant," 2019.

Annexes

Annexe A

Grille d'évaluation de poste RULA

RULA Employee Assessment Worksheet

Complete this worksheet following the step-by-step procedure below. Keep a copy in the employee's personnel folder for future reference.

A. Arm & Wrist Analysis

Step 1: Locate Upper Arm Position
Step 1a: Adjust...
 If shoulder is raised: +1;
 If upper arm is abducted: +1;
 If arm is supported or person is leaning: -1
 Final Upper Arm Score =

Step 2: Locate Lower Arm Position
Step 2a: Adjust...
 If arm is working across midline of the body: +1;
 If arm out to side of body: +1
 Final Lower Arm Score =

Step 3: Locate Wrist Position
Step 3a: Adjust...
 If wrist is bent from the midline: +1
 Final Wrist Score =

Step 4: Wrist Twist
 If wrist is twisted mainly in mid-range = 1;
 If twist at or near end of twisting range = 2
 Wrist Twist Score =

Step 5: Look-up Posture Score in Table A
 Use values from steps 1, 2, 3 & 4 to locate Posture Score in table A
 Posture Score A =

Step 6: Add Muscle Use Score
 If posture mainly static (i.e. held for longer than 1 minute) or:
 If action repeatedly occurs 4 times per minute or more: +1
 Muscle Use Score =

Step 7: Add Force/load Score
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1;
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2;
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3
 Force/load Score =

Step 8: Find Row in Table C
 The completed score from the Arm/Wrist analysis is used to find the row on Table C
 Final Wrist & Arm Score =

SCORES

Table A

Upper Arm	Lower Arm	Wrist			
		1	2	3	4
1	1	1	2	3	3
1	2	2	2	3	3
2	1	2	3	3	4
2	2	3	3	4	4
3	1	3	4	4	5
3	2	4	4	4	5
4	1	4	4	4	5
4	2	4	4	4	5
5	1	5	5	5	6
5	2	5	5	5	6
6	1	6	6	6	7
6	2	6	6	6	7
7	1	7	7	7	8
7	2	7	7	7	8
8	1	8	8	8	9
8	2	8	8	8	9

Table B

Neck	Trunk Posture Score					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	2	2	2	2
2	2	2	3	3	3	3
3	3	3	4	4	4	4
4	4	4	4	5	5	5
5	5	5	5	5	6	6
6	6	6	6	6	6	6

Table C

1	Final Score					
	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	2	3	4	5	6
3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	4	4	5	6
5	4	4	5	5	6	7
6	4	4	5	5	6	7
7	5	5	5	6	7	7
8	5	5	6	7	7	7

B. Neck, Trunk & Leg Analysis

Step 9: Locate Neck Position
Step 9a: Adjust...
 If neck is twisted: +1; If neck is side-bending: +1
 Final Neck Score =

Step 10: Locate Trunk Position
Step 10a: Adjust...
 If trunk is twisted: +1; If trunk is side-bending: +1
 Final Trunk Score =

Step 11: Legs
 If legs & feet supported and balanced: +1;
 If not: +2
 Final Leg Score =

Step 12: Look-up Posture Score in Table B
 Use values from steps 9, 10 & 11 to locate Posture Score in Table B
 Posture B Score =

Step 13: Add Muscle Use Score
 If posture mainly static or:
 If action 4/minute or more: +1
 Muscle Use Score =

Step 14: Add Force/load Score
 If load less than 2 kg (intermittent): +0;
 If 2 kg to 10 kg (intermittent): +1;
 If 2 kg to 10 kg (static or repeated): +2;
 If more than 10 kg load or repeated or shocks: +3
 Force/load Score =

Step 15: Find Column in Table C
 The completed score from the Neck/Trunk & Leg analysis is used to find the column on Chart C
 Final Neck, Trunk & Leg Score =

Final Score =

Subject: _____
 Company: _____

Department: _____

Date: / / _____
 Scorer: _____

FINAL SCORE: 1 or 2 = Acceptable; 3 or 4 investigate further; 5 or 6 investigate further and change soon; 7 investigate and change immediately

Source: McAtamney, L. & Corlett, E.N. (1993) RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2) 91-99.

© Professor Alan Hedge, Cornell University, Feb. 2001

Annexe **B**

Mises en plan des pièces du prototype de liaison blocante

