Mise en place d'une démarche de conception d'un équipement mécano numérique en milieu de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint

par

Romuald Valdesse EKO'OLA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAITRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Sc.A

MONTRÉAL, LE 02 JANVIER 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

Romuald Valdesse EKO'OLA, 2025

Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Sylvie Nadeau, directrice de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Kurt Landau, codirecteur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Mickaël Gardoni, président du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Patrick Terriault, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 05 DÉCEMBRE 2024

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude aux personnes et aux institutions dont le soutien et les conseils ont été déterminants tout au long de mon parcours universitaire à l'École de technologie supérieure (ÉTS) de Montréal et pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie particulièrement ma directrice de recherche Professeure Sylvie Nadeau et mon codirecteur Professeur Kurt Landau pour le soutien constant que vous m'avez apporté, tant sur le plan académique que personnel. Je vous suis infiniment reconnaissant pour la discipline, la rigueur et le goût du travail bien fait que vous m'avez transmis

Par ailleurs, j'aimerais aussi remercier le programme Mitacs Accélération, Professeur Tahan, le CRSNG, l'ÉTS et mon partenaire industriel dont le suivi et le soutien financier ont permis la bonne réalisation de ce travail, mais aussi l'acquisition d'importantes connaissances pratiques en intervention ergonomique et équipements de réalité augmentée.

Je remercie tous les membres de mon jury de soutenance notamment, les Professeurs Mickaël Gardoni, et Patrick Terriault, respectivement président du jury, membre du jury et examinateur. Vos évaluations, observations et conseils avisés joueront un rôle essentiel dans l'enrichissement la qualité de ce travail.

Je remercie également tout le personnel de l'École de technologie supérieure, en particulier tout le personnel de la bibliothèque, le personnel du bureau du registraire et ceux des services informatiques. Votre support m'a été précieux à chaque fois que j'en ai eu besoin.

Un merci à tous les étudiants du Laboratoire de génie de facteurs humains appliqués et en particulier à ma jumelle de recherche avec qui j'ai cheminé durant ces deux années.

J’exprime chaleureusement ma plus profonde reconnaissance à ma famille au Cameroun et celle au Canada pour son soutien indéfectible, tant financier qu’émotionnel, et je vous suis infiniment reconnaissant pour les sacrifices et les encouragements qu’elles m’ont prodigués.

Mise en place d'une démarche de conception d'un équipement mécano numérique en milieu de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint

Romuald Valdesse EKO'OLA

RÉSUMÉ

Les systèmes et les équipements d'assistance destinés aux travailleurs sont conçus afin d'optimiser leurs performances lors de l'exécution de leurs tâches en soutenant ou en rehaussant leurs capacités et compétences. Toutefois, pour une même tâche, une grande diversité de ces équipements est disponible pour soutenir le travailleur, chacun comportant des contraintes et de risques en matière d'ergonomie ainsi que de santé et sécurité au travail (SST). Il est donc crucial d'identifier d'une part, l'équipement d'assistance présentant le moins de risques ergonomiques, de santé et de sécurité du travail. D'autre part, il est essentiel de déterminer, de manière optimale, l'équipement d'assistance le plus adapté à un groupe spécifique de travailleurs dans un poste de travail donné et pour des tâches précises. Cependant, la littérature recense très peu d'études mettant en avant une approche permettant une sélection systématique des systèmes/équipements d'assistance.

Par ailleurs, dans le contexte des assemblages complexes tel que dans le secteur aéronautique par exemple, il a été observé que les techniciens chargés des opérations de maintenance (désassemblage, inspection, assemblage) font fréquemment face à des conditions contraignantes : poste de travail aux dimensions restreintes, pièces localisées en hauteur et difficilement accessibles. Les travailleurs sont ainsi contraints à adopter des postures peu ou pas ergonomiques incluant parfois une combinaison de travail musculaire statique et flexion latérale ou torsion du buste ou du torse. Ceci crée une mauvaise biomécanique des membres supérieurs et une augmentation des risques de troubles musculosquelettiques (TMS).

L'objectif de cette étude est donc de fournir une démarche de conception d'équipement mécano numérique pour un poste de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint. Une démarche qui permet de répondre simultanément aux problèmes liés aux postes de travail non adaptés aux capacités et besoins des travailleurs et à la nécessité d'une démarche de sélection systématique d'équipements d'assistance destinés aux travailleurs.

Le résultat de cette étude est une démarche comportant trois phases : respectivement la phase de l'ergonomie physique, la phase de l'ergonomie cognitive et la phase d'évaluation des risques résiduels. Au cours de cette étude, cette démarche a été mise en œuvre pour un cas réaliste permettant ainsi : 1) d'améliorer significativement l'ergonomie dans le poste d'assemblage du module 8 de la turbine à gaz du partenaire industriel, réduisant par conséquent les risques de troubles musculosquelettiques; 2) de réduire les risques de blessures par choc avec les parois internes de la turbine; 3) de réaliser un choix optimal de l'équipement d'assistance approprié pour le poste d'assemblage.

Enfin, il convient de souligner que la principale limite de notre étude réside dans le fait qu'il s'agit d'une étude de cas. Par conséquent, la généralisation de nos résultats ne pourra être établie qu'à la suite de multiples études de cas.

Mots clés : Assemblage complexe, ergonomie, sélection systématique, système d'assistance, espace restreint, visiocasque

Implementation of a design approach for a mecha numerical equipment in the workplace in a context of complex assembly in restricted space

Romuald Valdesse EKO'OLA

ABSTRACT

Systems and assistive equipment for workers are designed to optimise their performance in performing their tasks by supporting or enhancing their abilities and skills. However, for the same task, a wide variety of these equipments is available to support the worker, each with its own constraints and risks in terms of ergonomics as well as occupational health and safety (OHS). It is therefore crucial to identify, on the one hand, the assistive equipment with the least ergonomic, occupational health and safety risks. On the other hand, it is essential to determine optimally the most suitable assistance equipment for a specific group of workers in a given workplace and for specific tasks. However, the literature indicates very few studies that highlight an approach allowing a systematic selection of assistive systems/equipment.

In addition, in the context of complex assemblies such as in the aeronautics sector, it has been observed that technicians responsible for maintenance operations (disassembly, inspection, assembly) frequently face restrictive conditions: restricted workspace, high-rise and hard-to-reach components. Workers are thus forced to adopt low or non-ergonomic postures, sometimes including a combination of static muscular work and lateral flexion or torso torsion. This creates poor biomechanics of the upper limbs and an increased risk of musculoskeletal disorders (MSD).

The objective of this study is therefore to provide a digital mechanical equipment design approach for a workstation in a context of complex assembly in limited space. An approach that simultaneously addresses the problem of workstations not adapted to workers' abilities and needs for a systematic selection of assistance equipment for workers.

The result of this study is a three-phase approach: the physical ergonomics, cognitive ergonomics and residual risk assessment phases. During this study, this approach was applied to a realistic case which thus: 1) significantly improves the ergonomics in the assembly station of module 8 of the gas turbine of the industrial partner, reducing the risk of musculoskeletal disorders; 2) reduces the risk of shock injuries to the internal walls of the turbine; 3) provides an optimal choice of the appropriate assistive equipment for the assembly station.

Finally, it should be noted that the main limitation of our study is that it is a case study. Therefore, the generalisation of our results can only be established after multiple case studies.

Keywords: complex assembly, ergonomics, systematic selection, assistance systems, restricted space, visual headset

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....3
1.1 L'ergonomie en milieu de travail.....3
1.1.1 Ergonomie physique 4
1.1.1.1 Les facteurs biomécaniques 6
1.1.1.2 Facteurs liés à l'utilisation d'outils manuels..... 7
1.1.2 Ergonomie cognitive..... 8
1.1.2.1 Compatibilité cognitive..... 8
1.1.2.2 Charge de travail mentale 9
1.2 Approche traditionnelle de conception et les défis 10
1.2.1 Démarche d'une conception mécanique 10
1.2.1.1 Présentation de la démarche..... 10
1.2.1.2 Avantage de la démarche 12
1.2.2 Approche pour le choix d'un équipement d'assistance 12
1.2.2.1 Méthodologie proposée par Mark, Rauch, et Matt (2022)..... 15
1.2.2.2 Méthodologie proposée par Syberfeldt et al. (2017) 18
1.3 Équipements d'assistance informationnelle.....21
1.3.1 Technologie de base des équipements d'assistance informationnelle récente 21
1.3.2 Catégorie d'équipements d'assistance utilisés dans le domaine des assemblages complexes et basés sur la RA..... 22
1.3.2.1 Projecteur d'instructions 22
1.3.2.2 Les visiocasques..... 25
1.3.2.3 Les écrans mobiles 27
1.4 Étude de l'utilisabilité 28
1.4.1 Définition et cadre de travail..... 28
1.4.2 Critères d'évaluation de l'utilisabilité..... 30
1.4.2.1 L'efficacité 30
1.4.2.2 L'efficience 31
1.4.2.3 La satisfaction des utilisateurs 32
1.4.2.4 Autres critères d'utilisabilité..... 32
1.4.2.5 Quelques recommandations en utilisabilité 33
1.5 Question de recherche.....34

CHAPITRE 2 OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE 37
2.1 Cadre de l'étude 37
2.2 Objectif général.....41
2.3 Approche méthodologique : recherche en conception (Design science research).....42
2.3.1 Clarification de la recherche 43
2.3.2 Étude descriptive I 44

2.3.3 Étude prescriptive 44
2.3.4 Étude descriptive II 44
2.4 Méthode de collecte des données 45
2.5 Méthode de traitement des données 45
2.6 Évaluation des résultats 46

CHAPITRE 3 RÉSULTAT (PARTIE 1) : LA DÉMARCHE 47
3.1 Démarche de conception d'équipement mécano numérique en milieu de travail 47
3.1.1 Représentation graphique de la démarche 47
3.1.2 Représentation textuelle de la démarche 48
3.1.2.1 Phase réservée à l'ergonomie physique 48
3.1.2.2 Phase réservée à l'ergonomie cognitive 50
3.1.2.3 Phase d'évaluation globale 51

CHAPITRE 4 RÉSULTAT (PARTIE 2) : CAS D'ÉTUDE – PHASE DE L'ERGONOMIE PHYSIQUE 53
4.1 Phase d'ergonomie physique 53
4.1.1 Analyse et synthèse du problème 53
4.1.2 Hypothèses relatives au problème 62
4.1.3 Choix des variables spécifiques pour l'étude 63
4.1.4 Choix des méthodes d'étude 63
4.1.5 Élaboration des solutions 63
4.1.5.1 Amélioration de la posture 63
4.1.5.2 Optimisation de l'espace de travail 65
4.1.5.3 Conception de l'outil mécanique 72
4.1.6 Étude de l'impact de la solution 83

CHAPITRE 5 RÉSULTAT (PARTIE 3) : CAS D'ÉTUDE – PHASE DE L'ERGONOMIE COGNITIVE ET ÉVALUATION GLOBALE 87
5.1 Sélection du type d'assistance 87
5.2 Mise en place de l'AHP 90
5.2.1 Définition des critères de comparaison retenus pour les visiocasques 90
5.2.1.1 Champ visuel 91
5.2.1.2 La masse et sa répartition sur le visiocasque 92
5.2.1.3 Le mode d'alimentation 94
5.2.1.4 L'autonomie de la batterie 95
5.2.1.5 Le mode de visualisation 95
5.2.1.6 La connectivité 97
5.2.1.7 La caméra 97
5.2.1.8 Le stockage 97
5.2.1.9 Le mode d'interaction 97
5.2.1.10 Mémoire et processeur 103
5.2.2 Hiérarchisation du problème 104
5.2.3 Établissement des priorités relatives entre les groupes de critères et entre les sous-critères 107

5.2.3.1 Établissement de la matrice de comparaison du premier niveau de critères 107
5.2.3.2 Établissement de la matrice de comparaison du deuxième niveau de critères : critères ergonomiques 109
5.2.3.3 Établissement de la matrice de comparaison du deuxième niveau de critères : critères techniques 111
5.2.4 Établissement des matrices de comparaison des alternatives par rapport aux critères 113
5.2.5 Résultat de l'AHP 118
5.3 Évaluation de l'acceptabilité pratique et de l'utilisabilité 119
5.3.1 Magic Leap 2 119
5.3.1.1 Confort et design 119
5.3.1.2 Facilité d'utilisation et mémorabilité 120
5.3.1.3 Compatibilité avec les logiciels 121
5.3.2 Microsoft Hololens 2 122
5.3.2.1 Confort et design 122
5.3.2.2 Facilité d'utilisation et mémorabilité 123
5.3.2.3 Compatibilité avec les logiciels 124
5.4 Phase d'évaluation globale 125

CHAPITRE 6 DISCUSSION 133
6.1 Comparaison avec les approches de sélection systématique relevées dans la littérature 133
6.1.1 Comparaison avec l'approche de Mark et al. (2022) 133
6.1.2 Comparaison avec l'approche de Syberfeldt et al. (2017) 134
6.2 Biais et limites de la méthodologie adoptée 134
6.2.1 Validité interne et externe 134
6.2.1.1 Validité interne 134
6.2.1.2 Validité externe 136
6.2.2 Limites de l'étude 136

CONCLUSION 139

RECOMMANDATIONS 141

ANNEXE I LISTE DE PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU PROJET 143

ANNEXE II RÉSUMÉ ET PRÉSENTATION AQHSST 145

ANNEXE III DIMENSIONS PERTINENTES DE LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE TRAVAIL 155

ANNEXE IV SIMULATION SUR CATIA V5 AVEC LA POPULATION MASCULINE 157

ANNEXE V ÉVALUATION ERGONOMIQUE DES POSTURES LORS DU BOULONNAGE FINAL DES ÉTAGES DE BOULONS.....163

ANNEXE VI LISTE DES LUNETTES PRÉSÉLECTIONNÉES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES 173

ANNEXE VII CALCUL DES RATIOS DE COHÉRENCE DES MATRICES DE COMPARAISONS BINAIRES.....179

ANNEXE VIII APPRÉCIATION DE LA GRAVITÉ DU RISQUE 183

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 185

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 État de l'art des études menées sur les équipements d'assistance 13

Tableau 1.2 Avantages et limites du système de projecteur d'instructions 25

Tableau 1.3 Avantages et limites du système des visiocasques 27

Tableau 1.4 Avantages et limites du système des écrans mobiles.....27

Tableau 4.1 Regroupement des données sur les angles de confort des membres supérieurs 65

Tableau 4.2 Tableau de synthèse des recommandations 71

Tableau 4.3 Fonction principale 74

Tableau 4.4 Fonction contrainte 2 75

Tableau 4.5 Fonction contrainte 3 76

Tableau 4.6 Fonction contrainte 4 78

Tableau 4.7 Fonction contrainte 5 79

Tableau 4.8 Fonction contrainte 6 80

Tableau 4.9 Fonction contrainte 7 80

Tableau 4.10 Tableau récapitulatif des Score RULA des postures proposées vs anciennes postures 85

Tableau 5.1 Tri préliminaire des systèmes d'assistance 89

Tableau 5.2 Matrice de comparaison des critères du 1er niveau hiérarchique 108

Tableau 5.3 Matrice de comparaison des sous-critères ergonomiques.....110

Tableau 5.4 Matrice de comparaison des critères des sous-critères techniques 112

Tableau 5.5 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère champ visuel.....113

Tableau 5.6 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère masse 114

Tableau 5.7 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère mode de visualisation 114

Tableau 5.8 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère interactions 114

Tableau 5.9 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au critère connectivité 115

Tableau 5.10 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère autonomie 115

Tableau 5.11 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère processeur 115

Tableau 5.12 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère mémoire 116

Tableau 5.13 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère caméra 116

Tableau 5.14 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère stockage 116

Tableau 5.15 Ratio de cohérence des matrices de comparaison 117

Tableau 5.16 Extrait du tableau AMDEC du nouveau poste d'assemblage des étages du module 8 de la turbine 127

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Modèle conceptuel des facteurs de risques des TMS 5

Figure 1.2 Les étapes du processus de conception mécanique.....12

Figure 1.3 Méthodologie de sélection systématique 17

Figure 1.4 Processus de sélection mis en œuvre sur 12 lunettes.....20

Figure 1.5 Architecture du système de projecteur d'instructions.....23

Figure 1.6 Les groupes de visiocasque : en (a) visiocasque VST et en (b) visiocasque OST 26

Figure 1.7 Cadre d'évaluation de l'utilisabilité selon la norme ISO 9241-11 30

Figure 2.1 Poste d'assemblage des modules 8 des turbines à gaz.....38

Figure 2.2 Poste de désassemblage des modules 8 des turbines à gaz.....39

Figure 2.3 Système de travail d'assemblage et désassemblage du module 8 d'une turbine à gaz chez le partenaire industriel 40

Figure 2.4 Méthodologie de la recherche en conception.....43

Figure 3.1 Démarche de conception proposée 47

Figure 3.2 Démarche de l'approche ergonomique classique 49

Figure 4.1 Graphique d'analyse de processus d'assemblage du module 8 de turbine à gaz 54

Figure 4.2 Graphique des mouvements simultanés des deux mains pour la tâche deboulonnage des étages du module 8.....55

Figure 4.3 Posture des travailleurs en l'état actuel lors de la phase du serrage initial.....56

Figure 4.4 Posture des travailleurs en l'état actuel lors de la phase du serrage final ..58

Figure 4.5 Cône de vision du travailleur lors du boulonnage du deuxième étage de boulons.....59

Figure 4.6 Mannequin 5e centile assis sur le siège réglé à la hauteur minimale.....60

Figure 4.7 Détection de collision durant la simulation avec 95e centile homme exécutant le serrage initial 61

Figure 4.8 Modélisation sur Catia V5 du boulonnage (serrage initial) avec différents centiles de travailleurs 62

Figure 4.9 Angles de confort 64

Figure 4.10 Angles de confort (a) et zone de confort (b) pour une poste de travail assis 64

Figure 4.11 Simulation du serrage final du 1er étage par le 5e et 95e centile femme ..67

Figure 4.12 Simulation du serrage final du 2e étage par le 5e et 95e centile femme....68

Figure 4.13 Simulation du serrage final du 2e étage par le 5e centile femme dans la nouvelle configuration du poste de travail 69

Figure 4.14 Simulation du serrage final troisième étage par le 5e et le 95e centile dans la nouvelle configuration du poste de travail.....70

Figure 4.15 Diagramme bête à cornes 73

Figure 4.16 Diagramme pieuvre de l'outil manuel à concevoir 74

Figure 4.17 Tableau des efforts admissibles 77

Figure 4.18 Représentation simplifiée de la configuration de la tâche de boulonnage pour le calcul de l'encombrement de l'outil.....79

Figure 4.19 Diagramme Fast de l'outil mécanique 81

Figure 4.20 Vue de l'outil mécanique et de ses pièces constitutives 82

Figure 4.21 Dimensions des six rallonges en (a) et des six outils mécaniques en (b) ..83

Figure 5.1 Extrait de la taxonomie des systèmes d'assistance 88

Figure 5.2 Critères de comparaison des lunettes 91

Figure 5.3 Postures d'observation avec casque de réalité augmentée : a) posture neutre; b) posture de regard vers le haut; c) posture de flexion du corps; d) posture de regard vers le bas 93

Figure 5.4 Classification des modes d'interactions avec les lunettes intelligentes 98

Figure 5.5 Commande d'une lunette intelligente via son pavé tactile 99

Figure 5.6 Posture adoptée par le travailleur lors de l'utilisation du pavé tactile de la lunette 99

Figure 5.7 Interactions par reconnaissance gestuelle 101

Figure 5.8 Présélection des visiocasques 105

Figure 5.9 Hiérarchisation du choix de la meilleure lunette 106

Figure 5.10 Échelle de Saaty 107

Figure 5.11 Poids des critères du 1er niveau hiérarchique 108

Figure 5.12 Poids des sous-critères ergonomiques 110

Figure 5.13 Poids des sous-critères techniques 112

Figure 5.14 Résultat de l'AHP 118

Figure 5.15 Système de travail dans le nouveau poste d'assemblage des étages du module 8 de la turbine 125

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AFNOR	Association Française de Normalisation
AHP	Analyse Hiérarchique des Procédés
ASP	Association Sectorielle Paritaire
AMDEC	Analyse de Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs Criticités
CdCF	Cahier des Charges Fonctionnel
DRM	Design Research Methodology
FAST	Function Analysis System Technic
HF/E	Human Factors and Ergonomics
IPA	Interface de Programmation d'Application
MH 2	Microsoft Hololens 2
ML 2	Magic Leap 2
NA-AUTO	North Américan Automotive
OST	Optical See-Through
RA	Réalité Augmentée
RE	Réalité Étendue
RM	Réalité Mixte
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
RV	Réalité Virtuelle
SST	Santé et Sécurité du Travail
TMS	Troubles Musculosquelettiques
VST	Video See-Through

INTRODUCTION

Avec le développement industriel, la croissance de la concurrence dans le secteur manufacturier et l'essor technologique, l'exigence est de plus en plus élevée en ce qui concerne la qualité des produits et des services fournis par les entreprises. Par ailleurs, dans le secteur automobile et aéronautique particulièrement, les techniciens d'assemblage et de maintenance sont souvent confrontés à des postes de travail aux dimensions restreintes et à des outils pas spécifiquement conçus pour le poste. Ces situations obligent les travailleurs à adopter des postures contraignantes pour l'exécution des assemblages/désassemblages et des inspections (Maciukiewicz, Cudlip, Chopp-Hurley, & Dickerson, 2016 ; Wærsted, Koch, & Veiersted, 2020). Il est donc fréquent que les travailleurs exercent des travaux au-dessus du cœur avec une combinaison de travail musculaire statique et flexion latérale ou torsion du buste ou du torse.

En outre, les travailleurs doivent également prendre en considération une quantité importante d'informations liées aux tâches et aux pièces mécaniques qu'ils manipulent ou aux processus d'assemblage complexes (Petzoldt, Keiser, Beinke, & Freitag, 2020). Toutes ces conditions concourent à des situations de travail où les employés se retrouvent parfois avec des charges de travail et des risques de santé et sécurité au travail (SST) plus élevés. En effet, ils doivent satisfaire les productions plus flexibles tout en garantissant l'efficacité dans leurs tâches dans des postes de travail peu, voir non adaptés à leurs capacités et à leurs besoins.

Dans l'optique de réduire la charge de travail mentale des travailleurs dans le contexte des assemblages complexes, de nombreux systèmes d'assistance ont vu le jour avec pour but de soutenir les travailleurs dans leurs tâches. Cependant, d'une part, l'étroitesse et la composition complexe de certains postes de travail de l'assemblage rendent difficile l'adaptation de la plupart des systèmes d'assistance existants dans le domaine de l'assemblage/désassemblage et de l'inspection. D'autre part, la multitude d'équipements d'assistance existants sur le marché pose un tout autre problème aux entreprises : être capable de choisir de façon optimale,

l'équipement le mieux adapté pour une situation de travail par le biais d'un processus de sélection approprié (Mark, Rauch, & Matt, 2022).

Le but de cette étude est donc de fournir une démarche de conception ou de reconception de situation de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint pour un poste impliquant des outils mécaniques et le besoin d'assistance cognitive. Une démarche centrée sur l'humain qui permet d'adresser simultanément deux problématiques : d'une part , le problème lié aux postes de travail qui sont non adaptés aux capacités et besoins des travailleurs, et d'autre part, le manque de démarche de sélection systématique d'équipement d'assistance cognitive des travailleurs.

Pour ce faire, nous avons adopté la méthodologie de conception en recherche, ce qui nous a menés à réaliser au CHAPITRE 1 une revue de la littérature pertinente liée aux volets principaux sur lesquels porte le sujet de recherche. Notre sujet de recherche regroupe trois concepts principaux : l'ergonomie / génie des facteurs humains (HF/E), les équipements d'assistance, et les méthodologies de conception ou de sélections d'équipement d'assistance. Le CHAPITRE 2 situe le cadre de notre étude en présentant le système de travail du partenaire industriel de notre étude. Il présente également la méthodologie de recherche utilisée ainsi que l'objectif de l'étude. Le CHAPITRE 3 présente sous forme graphique et textuelle une première partie de nos résultats en détaillant les différentes étapes de la démarche que nous proposons. Les CHAPITRE 4 et 5 présentent par la suite la deuxième et la troisième partie de nos résultats. Il s'agit essentiellement d'une validation de notre démarche au travers d'une application au cas réaliste de notre partenaire industriel. Finalement, le CHAPITRE 6 présente une discussion sur les résultats de notre étude, ses biais et ses limites.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre a pour objectif de présenter une revue critique de la littérature pertinente qui s'intéresse aux volets principaux sur lesquels porte notre sujet de recherche. À cet effet, elle va dans un premier temps aborder l'ergonomie d'un point vue physique et cognitive dans les tâches d'assemblage complexe en espace restreint en présentant les facteurs contributifs à une mauvaise biomécanique des membres, une augmentation de la charge mentale et les risques liés. Cette première partie est réalisée dans le but de démontrer la nécessité d'améliorer les systèmes de travail en implémentant les principes ergonomiques. Cette revue va également introduire la notion d'équipements d'assistance cognitive ou informationnelle utilisées dans le contexte des assemblages pour réduire la charge mentale et les erreurs des travailleurs. Enfin, ce chapitre va présenter quelques approches traditionnellement utilisées dans le cadre de la conception mécanique et le choix d'équipement d'assistance cognitive.

1.1 L'ergonomie en milieu de travail

L'ergonomie/génie des facteurs humains (HF/E) ou encore la science du travail est une science interdisciplinaire qui s'intéresse aux interactions entre l'humain et les autres éléments d'un système de travail (Dar, Ahmad, & Masood, 2018). Elle conçoit et étudie les tâches, les produits, les situations de travail dans l'optique de les rendre compatibles avec les besoins, les capacités et les limitations des personnes (Salvendy & Karwowski, 2021). Sa raison d'être est d'assurer l'exécutabilité et l'acceptabilité d'un travail, la santé psychophysique du travail, créer la satisfaction au travail, optimiser la performance générale du système. À cet égard, il est nécessaire, dès la phase de conception d'un produit ou des éléments d'un système de travail, d'inclure les différents aspects couverts par l'ergonomie que sont principalement l'ergonomie physique, l'ergonomie cognitive et l'ergonomie organisationnelle (Dar et al., 2018 ; Hollnagel, 1997).

1.1.1 Ergonomie physique

L'ergonomie physique se rapporte principalement à l'étude des caractéristiques biomécaniques, physiques et anthropométriques de l'homme en rapport avec son activité physique (Salvendy & Karwowski, 2021) et son environnement de travail. La posture de travail (Beuß, Sender, & Flügge, 2019 ; Pistolesi, Baldassini, & Lazzerini, 2024 ; Rasoulivalajoozi, Rasouli, Cucuzzella, & Kwok, 2023), les travaux au-dessus du niveau du cœur (Panariello et al., 2022), les caractéristiques et les interactions avec les outils manuels (Strasser & Bullinger, 2007), les dimensions du poste de travail et enfin les troubles musculosquelettiques (TMS) (Asadi, Yu, & Mott, 2019 ; Barthelme, Sauter, Mueller, & Liebers, 2021) sont les thèmes qui ressortent généralement quand il est question d'ergonomie physique.

Les TMS sont une préoccupation principale pour les entreprises du fait de leurs impacts significatifs sur le plan socio-économique des entreprises ainsi que de leurs conséquences sur la santé des employés. Entre 2014 et 2015, 27,7% de la population active québécoise âgée de plus de 15 ans souffre de lésion musculosquelettique liée au travail (Ministère de la santé et des services sociaux, 2016). Par ailleurs, l'enquête menée par CNESST (2023) sur les lésions attribuables aux TMS en milieu de travail pour les années 2019 et 2022 montre que 66,9% des TMS enregistrés proviennent de cinq secteurs principaux : les soins et les services sociaux (26,1%), la fabrication des biens durables (11,7%), la fabrication des biens non durables (10,2%), la construction (9,6%) et le commerce de détail (9,2%).

Dans le secteur manufacturier, en général, la majorité des incidents ou accidents de travail enregistrés sont d'ordre musculosquelettique tel que les entorses, les foulures et des déchirures (US Departement of labor.Bureau of Labor Statistics, 2015). Les parties du corps les plus exposées sont généralement le bas du dos, les épaules, les jambes, les pieds, le cou, les bras et les mains (Chae & Kim, 2005 ; CNESST, 2023 ; Fajardo Rodriguez & Ortiz Mayorga, 2016 ; Kemp, Burnham, Copley, & Shim, 2010 ; Nogueira et al., 2012).

Diverses études dans la littérature expliquent la pathogenèse des TMS et les différents facteurs impliqués. Haukka (2010) présente dans la Figure 1.1 un modèle conceptuel qui suggère que le développement des TMS est lié entre autres, à l'organisation du travail, aux équipements utilisés, aux facteurs individuels des travailleurs et aux contraintes biomécaniques et psychosociales. Selon ce modèle, il existe une interaction entre les différents facteurs, par exemple, la contrainte biomécanique est influencée par la charge de travail qui est elle-même influencée par l'organisation de travail. Cependant, la façon dont chaque travailleur répondra aux contraintes biomécaniques dépendra entre autres de ses caractéristiques individuelles.

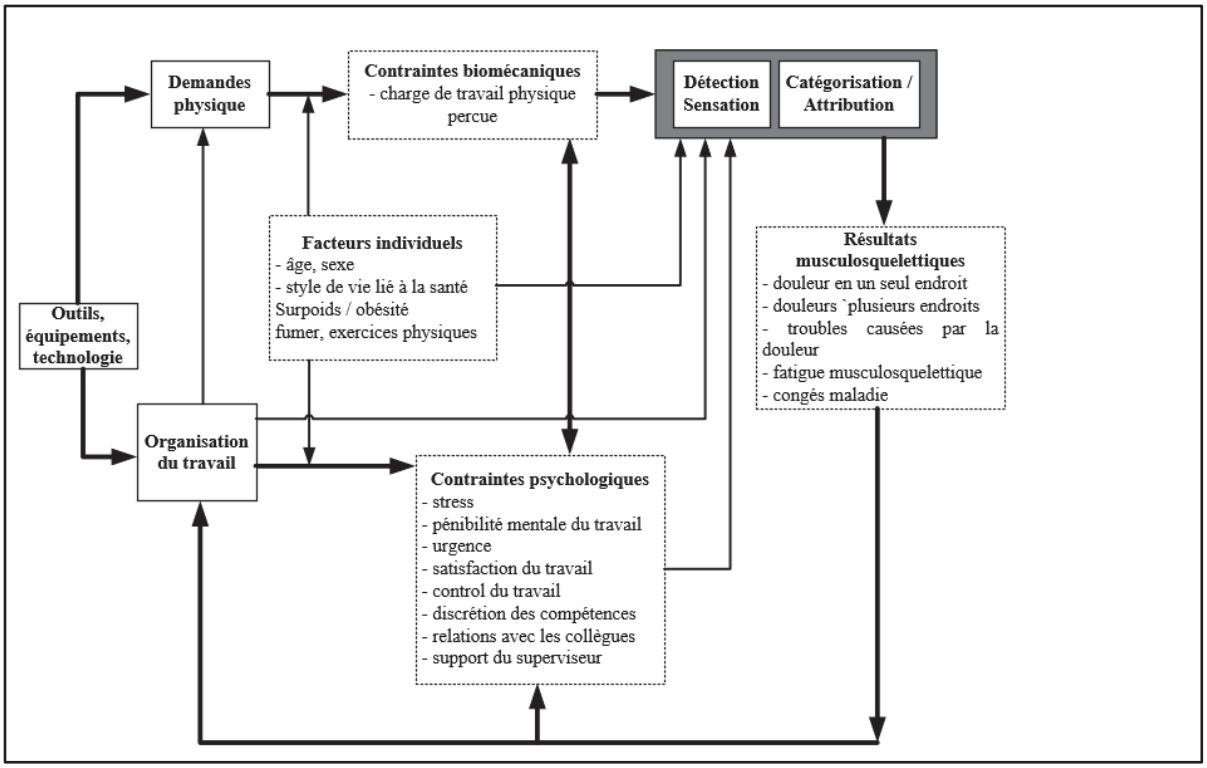


Figure 1.1 Modèle conceptuel des facteurs de risques des TMS

Tirée et adaptée de Haukka (2010)

1.1.1.1 Les facteurs biomécaniques

Les facteurs de risques biomécaniques sont principalement liés à la répétitivité des gestes, l'activité musculaire, le travail musculaire statique prolongé et les positions articulaires extrêmes (Chopp, Fischer, & Dickerson, 2010 ; INRS, 2011 ; Kuorinka et al., 1987).

❖ La répétitivité des mouvements

Selon Bruce P. et al. (2020), les travaux répétitifs des membres supérieurs (bras et mains) peuvent être définis comme étant des activités qui font recours de façon cyclique à des flexions et extensions des coudes, à la pronation, supination et flexion cyclique du poignet générant ainsi des charges dans la région du coude et de l'avant-bras. Lorsque le cycle est inférieur à 30 secondes ou lorsque pour 50% du temps de travail, les mêmes types d'actions sont exercés alors, la répétitivité peut être considérée comme importante (INRS, 2011). Le résumé d'un ensemble d'études épidémiologiques des TMS réalisés par Bruce P. et al. (2020) montre que :

- La répétitivité des mouvements est un facteur contribuant fortement au développement de la tendinite.
- Il existe un lien entre le développement de l'épicondylite et la fréquence d'exposition à une combinaison de facteur de risque tel que la force exercée et la répétitivité des mouvements d'une part et d'autre part la force exercée par le travailleur et la posture adoptée lors de la tâche.

❖ L'activité musculaire

D'après Kemp et al. (2010), une exploitation excessive des muscles favorise le développement des lésions musculosquelettiques. Dans le cas des travaux effectués au-dessus du niveau du cœur, Chopp et al. (2010) démontrent que la configuration du poste de travail, l'angle d'inclinaison des bras par rapport à la verticale et la direction de la force appliquée influencent significativement l'activité musculaire (effort musculaire et quantité de muscles sollicités). Pour les cas observés, ils ont relevé que :

- Les activités musculaires sont beaucoup plus élevées pour une configuration de travail standardisée (c'est-à-dire pas ajustée à l'anthropométrie de chaque

employé) que pour une configuration de travail à stature mesurée (poste de travail ajusté spécifiquement à l'employé);

- Tirer vers l'arrière dans un angle de la cible entre -15° et 0° présente une plus forte demande musculaire;
- Une faible demande musculaire est observée pour un angle de 30° et une force dirigée vers l'avant ou vers le bas;
- La direction de la force de la main est le facteur qui influence le plus l'activité musculaire ; la direction vers l'arrière (tirer vers l'arrière) est la direction la plus exigeante au vu de l'activité musculaire.

1.1.1.2 Facteurs liés à l'utilisation d'outils manuels

L'exécution de certaines tâches dans l'assemblage des équipements aéronautiques nécessite l'utilisation des outils manuels afin de faciliter le travail et augmenter la rapidité d'exécution de la tâche (Beuß et al., 2019). Une mauvaise conception d'un outil manuel peut contribuer à l'apparition des troubles musculosquelettiques des membres supérieurs (Buckle & Jason Devereux, 2002). Dans un système de travail impliquant l'utilisation d'un outil manuel, de nombreux paramètres entrent en jeu et influencent de façon significative le développement des TMS chez les travailleurs (Habes & Grant, 1997 ; Kuorinka et al., 1987 ; Sperling, Dahlman, Wikström, Kilbom, & Kadefors, 1993) :

- La masse de l'outil augmente la charge que doivent supporter les muscles du bras, des épaules et du dos;
- La forme de la poignée de l'outil exerce une forte influence sur l'activité musculaire et les propriétés de sa surface ont un impact sur le confort de la prise et la pression exercée lors de la prise;
- L'outil manuel doit être adapté aux dimensions de la main et à la force de l'utilisateur. En effet, pour un même outil, la force exercée par la main pour tenir l'outil diffèrera dépendamment des dimensions de la main. Pour fournir une même force, une plus petite

main aura plus d'efforts à fournir qu'une main adaptée à l'outil, et sera de ce fait plus rapidement sujette à la fatigue musculaire.

Par ailleurs, d'autres facteurs tels que le port de gants, les vibrations issues des outils manuels ou du poste de travail, un éclairage inadéquat et un environnement de travail à température basse (inférieur à 15°) peuvent induire à une augmentation des sollicitations biomécaniques et donc à une augmentation des risques de TMS.

1.1.2 Ergonomie cognitive

L'ergonomie cognitive s'intéresse à la réponse motrice des processus mentaux (Dar et al., 2018) qui interviennent durant chacune des interactions entre le travailleur et les éléments qui constituent son système de travail (les outils et équipements, les tâches, les processus et instructions de travail, etc.). Elle aborde ainsi les thèmes tels que la mémoire, la compatibilité cognitive, la prise de décision, la charge mentale, le traitement des informations, la représentation mentale et l'erreur humaine.

1.1.2.1 Compatibilité cognitive

Wickens et Hollands (2000) décrivent la compatibilité cognitive comme étant une adéquation entre les informations présentées au travailleur (les stimulus), le traitement de ces informations par le travailleur (processus centraux) et les actions motrices nécessaires (les réponses) pour l'accomplissement d'une tâche. Il est essentiel qu'il y ait compatibilité cognitive entre le travailleur et son système de travail. En effet, une incompatibilité cognitive peut conduire à une dégradation des performances : qualité du travail, temps d'exécution des tâches et taux d'erreurs (Bläsing, Bornewasser, & Hinrichsen, 2021).

Le nombre d'étapes cognitives du traitement interne des informations entre le stimulus et la réponse augmente avec la complexité de la tâche et des instructions guides, ce qui par la même occasion augmente le risque d'une incompatibilité entre le stimulus et la réponse (Bläsing et al., 2021). L'exécution d'une tâche relativement simple par exemple se fait de façon intuitive,

automatique et rapide, nécessitant dans le processus central, très peu ou pas d'étapes cognitives entre le stimulus reçu et la réponse émise. À l'inverse, pour une tâche complexe, l'exécution est réalisée à la suite d'un raisonnement construit autour des connaissances, des informations reçues et des modèles mentaux.

Les tâches d'assemblages complexes présentent un risque accru d'incompatibilité cognitive du fait des risques d'interprétations erronées des stimulus dues à une inconsistance d'informations ou à une surcharge d'informations (Hollnagel, 1998). Dans le cas d'une inconsistance d'informations acheminées au travailleur par exemple, les instructions d'assemblage fournies ne contiennent pas toutes les données nécessaires pour permettre une prise de décision judicieuse. Dans le cas d'une surcharge d'informations, le travailleur est inondé d'un flux important d'informations et pas nécessairement utiles pour l'étape active de la tâche en cours. En somme, les risques d'incompatibilité cognitive peuvent être significativement réduits en s'assurant que la quantité d'informations et de données adéquates parviennent au travailleur adéquat au moment adéquat et sous le format adéquat (Johansson et al., 2017 ; Khoddammhoammadi, Ngô, & Nadeau, 2023a).

1.1.2.2 Charge de travail mentale

La mémoire de travail encore vu comme étant l'unité de stockage du travailleur est l'élément central intervenant dans les processus cognitifs tels que le traitement d'informations et les prises de décision. Son rôle est de comparer les informations déjà en sa possession et les informations qui lui sont fournies afin de déclencher une réponse comportementale. Ainsi F. Chen et al. (2016) définissent la charge mentale comme étant la charge qui agit sur la mémoire de travail pendant l'exécution d'une tâche cognitive. Elle est considérée comme étant en surcharge lorsque la demande (tâche à exécuter) est supérieure aux ressources (compétences, informations fournies, expérience), en sous-charge dans le cas contraire et optimal lorsque les ressources disponibles sont égales à la demande (Thomas, 2000). Les deux premiers cas de charge mentale conduisent inévitablement à une dégradation des performances des travailleurs,

des troubles d'attention et des erreurs (Young, Brookhuis, Wickens, & Hancock, 2015). Par ailleurs, de nombreuses études à l'instar de celle de Bläsing et Bornewasser (2020) et celle de Bornewasser, Bläsing, et Hinrichsen (2018) soulignent que la charge mentale de travail augmente avec la complexité de la tâche à accomplir. Selon eux, en réponse à la croissance de la complexité des activités d'assemblage, l'utilisation des systèmes d'assistance informationnelle permet d'optimiser la gestion des informations et des instructions de travail en les rendant compatibles aux besoins cognitifs des travailleurs (Bornewasser et al., 2018). Ce faisant, cela permet de stabiliser la charge de travail mental du travailleur à un niveau optimal.

Au demeurant, en impliquant les aspects physiques et cognitifs de l'ergonomie dans la phase de conception de poste, de travail, d'outils ou d'équipement, l'ingénieur ergonome permet que le corps et l'esprit du travailleur soient tous deux à l'aise dans le travail (Hollnagel, 1998).

1.2 Approche traditionnelle de conception et les défis

1.2.1 Démarche d'une conception mécanique

1.2.1.1 Présentation de la démarche

La phase de conception est sans doute la phase la plus importante dans le processus de développement d'un produit. Les décisions et les orientations prises durant cette phase influencent significativement les fonctionnalités et l'utilisabilité du produit. Un processus de conception en mécanique se déroule en suivant trois étapes principales (*Voir* Figure 1.2) :

- Analyse du besoin
  Il s'agit ici de répondre le plus simplement et le plus clairement possible à l'unique question « c'est fait pour quoi ou dans quel but ? » et de dégager ainsi l'objectif ou les objectifs du produit à concevoir. Elle inclut la définition des spécifications techniques, contraintes

opérationnelles et du cahier de charge fonctionnel (CDCF). Les outils d'assurance qualité qui interviennent à cette étape sont le diagramme bête à cornes et le diagramme pieuvre. Une fois validé, le CDFC permet de passer à l'étape de conception suivante.

- Étude de la faisabilité

  L'étude de la faisabilité est l'étape la plus délicate du processus de conception. C'est à cette étape qu'il faut répondre à la question « c'est fait comment ? ». Ici, le concepteur doit mettre en place une méthodologie afin de produire théoriquement un maximum de solutions techniques permettant de répondre au besoin. L'outil d'assurance qualité généralement utilisé pour aider le concepteur durant la phase de recherche de solutions est le FAST (Fonction Analysis System Technique) de conception. Si au terme des recherches, plusieurs solutions possibles en ressortent, le concepteur va évaluer et attribuer une note à chacune à la base d'un ensemble de critères. Des calculs de dimensionnement sont également réalisés à cette étape pour procéder à l'élimination des alternatives non satisfaisantes.

- L'avant-projet

  Cette étape permet de générer un dossier contenant toutes les spécifications techniques de la solution finalement retenue (solution ayant obtenu le score le plus élevé durant l'étude de la faisabilité). Ce dossier contient entre autres le dessin technique d'avant-projet qui définit le produit en termes de solutions technologiques dont le niveau de détail est proportionnel à la complexité de la fonction à réaliser; les détails de la composition du produit; l'étude de risque sous forme d'AMDEC de conception (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leurs Criticité); l'évaluation du coût du produit et les spécifications des produits manufacturés.

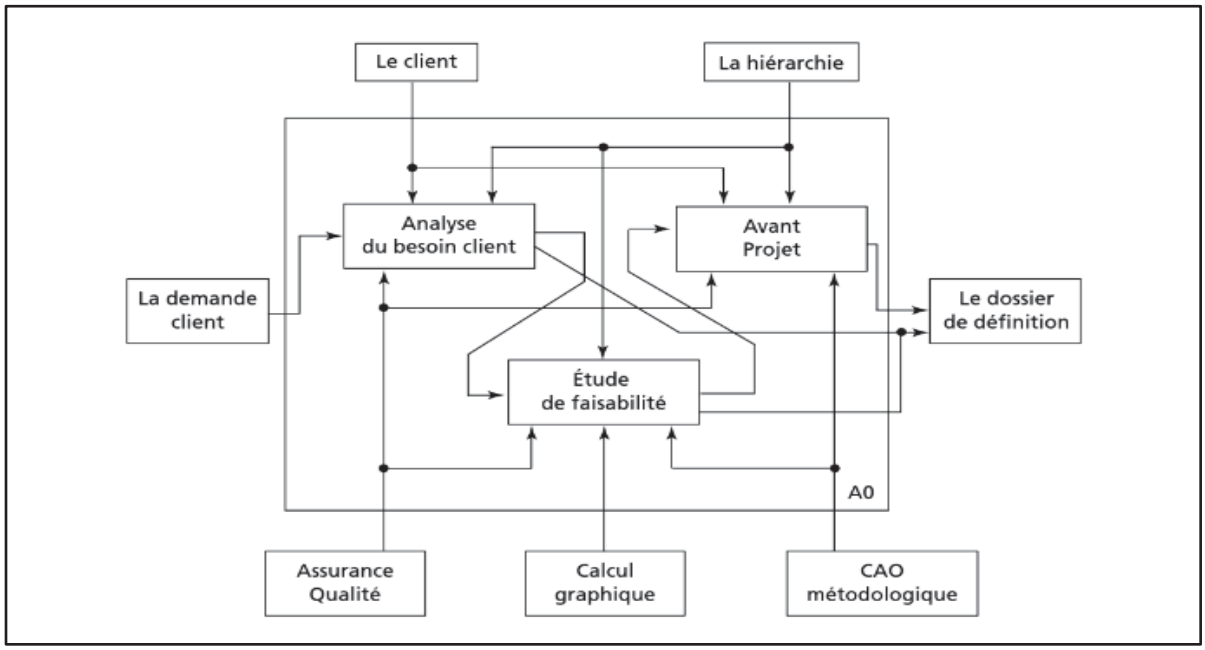


Figure 1.2 Les étapes du processus de conception mécanique
Tirée de Boisseau (2016)

1.2.1.2 Avantage de la démarche

L'avantage de cette démarche est qu'elle fait recours à un ensemble d'outils d'assurance qualité adaptés à chacune des étapes du processus de conception. L'assurance qualité n'est donc pas réalisée uniquement à postériori, mais durant chacune des phases de la conception. Ce faisant, elle permet non seulement de gagner du temps tout en réalisant des analyses exhaustives, mais aussi, elle permet d'assurer que le produit développé est conforme aux exigences liées aux futurs utilisateurs et à l'environnement où il sera utilisé.

1.2.2 Approche pour le choix d'un équipement d'assistance

La cinquième révolution industrielle ou l'industrie 5.0 met l'aspect humain au centre des développements technologiques. Elle a permis l'émergence d'une vaste diversité d'équipements technologiques destinés à travailler en étroite collaboration avec l'humain dans le but d'optimiser les systèmes de travail tout en apportant la sécurité et le bien-être aux

humains. Dans le domaine manufacturier en général, ces équipements d'assistance sont regroupés en trois principales catégories dépendamment du type de support qu'ils confèrent. L'on distingue ainsi les équipements d'assistance sensorielle, physique et cognitive (Romero, Bernus, Noran, Stahre, & Fast-Berglund, 2016).

Compte tenu de la multitude de variétés d'équipements d'assistance, il convient d'avoir une approche systématique qui donne des lignes directrices afin de procéder de façon optimale au choix d'équipement adéquat pour un poste et une tâche précise. Cependant, il existe dans la littérature scientifique très peu d'études qui se focalisent sur la question et l'état de l'art de la littérature montre que les études portent leur intérêt sur d'autres aspects des équipements d'assistance (*Voir* Tableau 1.1). En effet, de nombreuses études s'intéressent uniquement à la classification des équipements d'assistance (Fellmann, Robert, Büttner, Mucha, & Röcker, 2017 ; Merazzi & Friedel, 2017), d'autres à leur implémentation et leur évaluation en contexte réel (Hold, Erol, Reisinger, & Sihn, 2017 ; Hold & Sihn, 2016).

Tableau 1.1 État de l'art des études menées sur les équipements d'assistance
Tiré et adapté de Mark, Rauch, et Matt (2022)

Auteur	Titre	Année	Type de document	Points saillants	limitations
Deuse et al.	une méthodologie pour la planification et l'implémentation de la robotique de service dans le processus de travail industriel	2014	Document de conférence	- La méthodologie détermine le degré d'automatisation des processus de travail - Le client peut ajouter des données, des paramètres et les conditions cadres sur le processus de travail manuel à un portail internet - L'outil de planification recommande ensuite les composants du robot et les plans de mouvement pour la tâche spécifique	- Uniquement pour la robotique de service - Pas de méthodologie pour sélectionner d'autres systèmes en tenant compte de divers facteurs
Senderek et Geisler	Les systèmes d'assistance pour le support d'apprentissage dans l'industrie 4.0 [Assistenzsysteme zur Lernunterstützung in der Industrie 4.0]	2015	Document de conférence	L'article met en évidence les exigences dans la conception des systèmes d'assistance et les potentiels et obstacles dans leur mise en œuvre.	Ne mentionne que dans la conclusion que pour accepter les systèmes d'assistance, il faut intégrer des boucles de rétroaction avec les employés
Galaske et Anderl	Approche pour le développement d'un système adaptatif d'assistance aux travailleurs basé sur un modèle de données de profil individualisé	2016	Article	- Système d'assistance aux travailleurs individualisé qui tient compte des différentes qualifications, rôles et caractéristiques personnelles - Modèle de données de profil pour l'intégration des informations individuelles de l'opérateur dans les systèmes de production cyber-physiques	Aucune suggestion de systèmes d'assistance spécifiques, seulement une approche pour le développement de systèmes d'assistance individualisés et adaptatifs
Hold, Ranz, Sihn, et Hummel	Planification du soutien des opérateurs dans les systèmes d'assemblage cyber-physiques	2016	Document de conférence	- Approche de planification des systèmes de soutien technique et numérique pour les systèmes d'assemblage cyber-physiques - L'approche ne se limite pas à certains secteurs	- Aucune suggestion de systèmes d'assistance spécifique - Ne comprend pas les aspects de sécurité

Auteur	Titre	Année	Type de document	Points saillants	limitations
Alkhatib et Rensing	Vers une classification des systèmes d'aide à l'apprentissage sur le lieu de travail numérisé	2016	Document de conférence	Article traite des aspects didactiques, techniques et pédagogiques pour caractériser les systèmes d'apprentissage sur le lieu de travail numérisé et la manufacture	- Aucune suggestion de systèmes d'assistance - S'intéresse uniquement aux systèmes d'apprentissage et non aux systèmes d'aide aux travailleurs
Hold et Sihn	Vers un modèle permettant d'identifier le besoin et l'efficacité économique des systèmes d'assistance numérique dans les systèmes de montage cyber-physique	2016	Document de conférence	- Modèle d'analyse et de planification des potentiels individuels, des besoins et des composants des systèmes d'assistance numériques et des systèmes d'assistance cyber-physiques - Aide à la décision pour étudier les inconvénients et les avantages économiques des systèmes d'assistance	- Aucune suggestion de systèmes d'assistance - Aucune méthode permettant de sélectionner correctement un système
Fellmann et al.	Vers un cadre de systèmes d'assistance pour soutenir les processus de travail dans les usines intelligentes	2017	Document de conférence	Cadre de classification des systèmes d'assistance	- Pas de méthode de sélection des systèmes d'assistance - Pas d'inclusion du travailleur lui-même dans le cadre
Hold, Erol, Reisinger, et Sihn	Planification et évaluation des systèmes d'assistance numériques	2017	Document de conférence	Semblable à Hold, Ranz, Sihn et Hummel (2016 a) et Hold and Sihn (2016b)	Semblable à Hold, Ranz, Sihn et Hummel (2016 a) et Hold and Sihn (2016b)
Merazzi et Friedel	Classification et évaluation des systèmes d'assistance pour l'assemblage manuel [Einteilung und Bewertung von Montageassistenzsystemen]	2017	Article	- Classification et évaluation d'une sélection de systèmes d'assistance au montage - Examen du potentiel de soutien sur la base d'un exemple	- L'opérateur n'est pas mentionné dans la méthode de classification - Sélection limitée des systèmes - Aucune méthodologie pour sélectionner un système approprié
Arndt, Czwick et Anderl	Ligne directrice pour la mise en œuvre de systèmes d'assistance à l'humain dans les usines intelligentes	2018	Document de conférence	Méthodologie pour la mise en œuvre des systèmes d'assistance aux opérateurs	- Pas de sélection d'un système d'assistance approprié - Approche méthodologique générale - Pas d'inclusion spécifique des caractéristiques du travailleur lui-même dans la méthodologie (seulement générale)
Merkel et al.	Conception spécifique des systèmes d'assistance pour le travail manuel en production	2018	Document de conférence	Conception spécifique d'un système d'assistance pour le travail manuel en production	- Pas de sélection d'un système d'assistance approprié - Aucune suggestion de système approprié
Keller, Bayer, Bausch et Metternich	Évaluation des avantages des systèmes d'assistance numériques pour les postes de travail d'assemblage	2019	Document de conférence	- Cadre d'analyse de l'influence des systèmes d'assistance - Approche permettant de quantifier les bénéfices du soutien en production	- Pas de méthodologie de sélection - Pas de suggestion d'un système d'assistance et de différenciation de l'opérateur
Mark et al.	Analyse des groupes d'utilisateurs pour les systèmes d'assistance en production 4.0	2019	Document de conférence	- Catégorisation des groupes d'utilisateurs dans la production et la discussion des systèmes d'assistance - Le document fournit une proposition pour l'appariement des systèmes d'assistance avec les groupes d'utilisateurs	- Pas d'inclusion de la tâche à effectuer - Cartographie générale du système d'assistance avec l'opérateur uniquement

Néanmoins, certains auteurs ont mis sur pied des méthodologies de sélection d'équipement d'assistance. Notamment Mark, Rauch, et Matt (2022) proposent une méthodologie destinée à fournir un support de choix d'équipement dans le cadre général des postes et tâches d'assemblage en prenant en compte les paramètres liés au travailleur, à la tâche de travail et au

lieu de travail. Syberfeldt, Danielsson, et Gustavsson (2017) fournissent eux aussi à travers leur méthodologie, des lignes directrices quant au choix d'un équipement précis d'un type particulier d'équipement d'assistance en assemblage.

1.2.2.1 Méthodologie proposée par Mark, Rauch, et Matt (2022)

La Figure 1.3 présente de manière holistique le processus de sélection systématique en interaction avec un catalogue de données de niveau supérieur et la phase de conception et de mise en œuvre qui suit la sélection de l'équipement. Le catalogue de données cité précédemment est un cadre normatif, une liste méthodique qui rassemble l'ensemble des types d'équipements d'assistance existant sur le marché.
Le processus de sélection en lui-même est constitué de quatre étapes :

- L'analyse du lieu et de l'environnement de travail

Cette étape permet d'identifier les contraintes et les limites auxquelles l'équipement d'assistance devra s'adapter. Cette étape est nécessaire afin de comparer les caractéristiques des équipements du catalogue avec les caractéristiques de base de l'environnement de travail. Ainsi dans une phase précoce il est possible d'éliminer les équipements qui ne conviennent pas à l'environnement ou de remédier à une limitation spécifique de l'environnement.

- L'analyse de la tâche et du travailleur

Cette étape permet de relever les paramètres pertinents liés à la tâche et aux besoins des travailleurs. À cette fin, Mark, Rauch, et Matt (2022) mettent sur pied une liste de 23 paramètres regroupés dans cinq catégories notamment sens pertinents, capacité physique, capacité cognitive, qualités personnelles et compétences. La tâche est évaluée sur la base de ces 23 paramètres, ce qui permet l'établissement d'un vecteur $\vec{A}$ de 23 lignes encodées à l'aide d'une échelle indiquant la pertinence de chaque paramètre : la valeur 1 lorsque le paramètre est nécessaire, 0,5 lorsque le paramètre est partiellement nécessaire et 0 lorsqu'il est non nécessaire. Les besoins de support du travailleur sont également évalués sur la base de ces

mêmes 23 paramètres et un autre vecteur $\vec{B}$ de 23 lignes est établi. Pour ce dernier vecteur, l'échelle d'encodage varie de 0 (aucune aide nécessaire) à 5 (aide maximale nécessaire).

❖ L'adéquation entre l'analyse de la tâche spécifique et le travailleur

À cette étape, le but est d'identifier les paramètres partiellement ou pas couverts par les capacités propres aux travailleurs en établissant une correspondance entre les besoins des travailleurs et les paramètres pertinents liés à la tâche. Concrètement, il s'agit ici d'un point de vue mathématique de faire une multiplication par composant des deux précédents vecteurs dans le but d'obtenir un nouveau vecteur de 23 lignes $\vec{C} = \vec{A} \bullet \vec{B}$.

❖ Correspondance avec le catalogue des équipements d'assistance

À cette étape, il est premièrement question d'effectuer l'évaluation des équipements d'assistance du catalogue (25 équipements) sur la base des 23 paramètres précédemment identifiés. Elle consiste à évaluer le niveau de support que chaque équipement fournit pour chacun des 23 paramètres. Une échelle allant de 0 (l'équipement n'apporte aucun soutien pour ce paramètre) à 10 (le soutien apporté par l'équipement est maximal pour ce paramètre) est utilisée. Il en résulte une matrice M de 25 lignes et 23 colonnes.

Afin d'identifier le système le plus approprié pour répondre simultanément aux besoins du travailleur et aux contraintes de la tâche, une correspondance est établie avec le catalogue de données. Pour cela, un produit est réalisé entre la matrice M et le vecteur $\vec{C}$ donnant alors le vecteur $\vec{S} = M * \vec{C}$. Chacune des lignes du vecteur obtenu correspond à un équipement d'assistance et la valeur numérique associée indique son niveau de correspondance au besoin. Les équipements sont par la suite classés par ordre décroissant de valeur numérique associée. Une fois le classement terminé, les équipements les mieux classés sont sélectionnés pour être examinés plus en détail en fonctions d'autres paramètres.

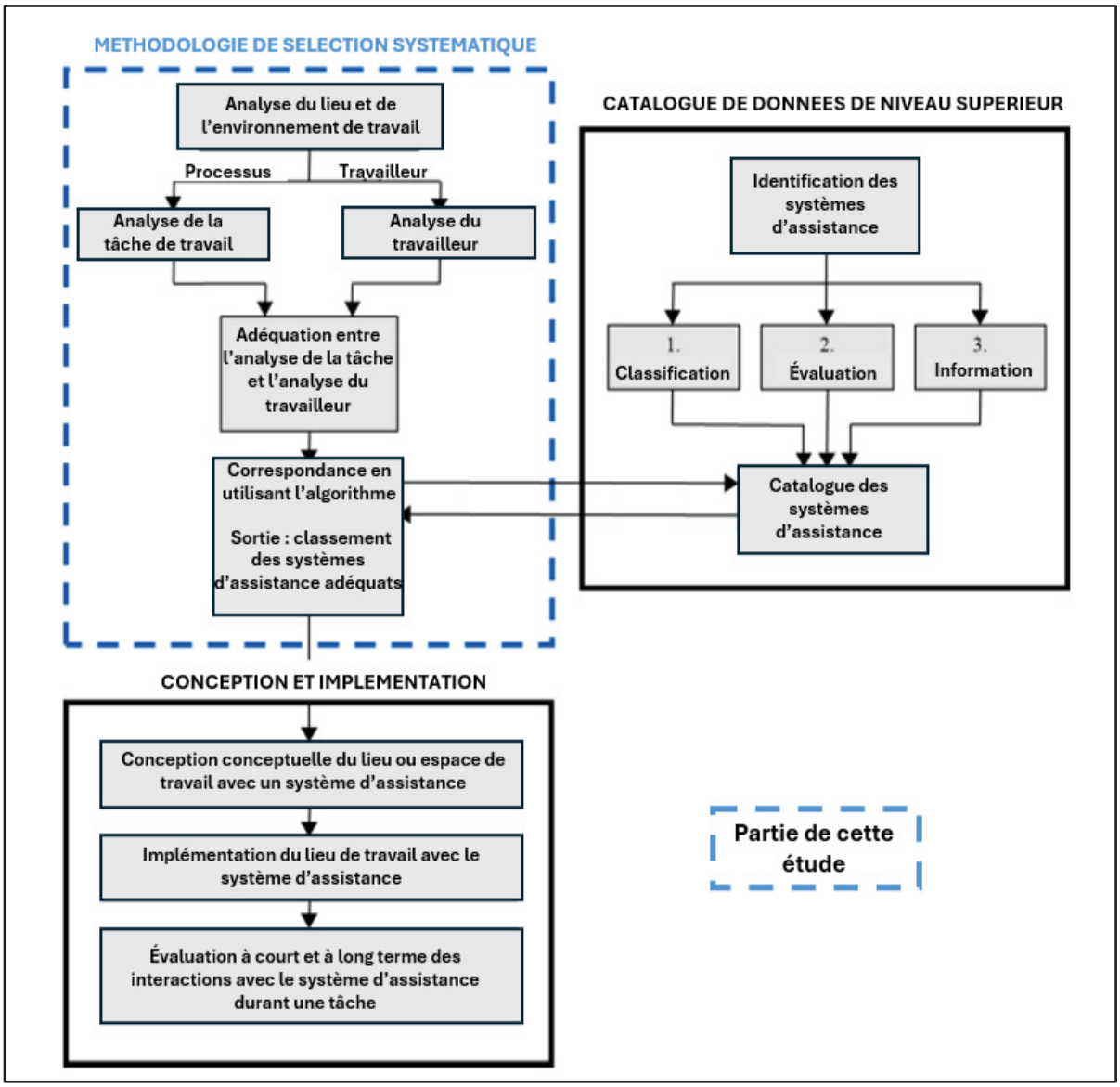


Figure 1.3 Méthodologie de sélection systématique
Tirée et adaptée de Mark, Rauch, et Matt (2022)

La méthodologie proposée par Mark, Rauch, et Matt (2022) est innovante et générale dans le sens où elle peut être utilisée dans divers contextes pour divers type d'équipements d'assistance. Elle ne se limite pas uniquement aux équipements d'assistance cognitive, mais prend également en considération les équipements d'assistance sensorielle et physique et la possibilité d'une combinaison de deux ou trois de ces types d'équipement pour résoudre un problème identifié. Cette méthodologie permet d'étudier spécifiquement la tâche, le travailleur

et l'environnement de travail. Par ailleurs, elle permet non seulement une réelle prise en compte des contraintes et besoins de chacun des intervenants d'un système de travail, mais permet également l'évaluation contextuelle de la quasi-totalité des équipements d'assistance présents sur le marché grâce à son catalogue de données de haut niveau.

En revanche, nous notons que cette méthodologie de choix d'équipement est destinée à une utilisation dans un contexte manufacturier général. Spécifiquement dans le cadre des assemblages complexes en espaces de travail restreint, elle ne peut suffire à déterminer spécifiquement l'équipement adéquat pour le support des travailleurs.

En effet, de multiples études ont démontré que les équipements d'assistance les mieux adaptés dans ces contextes sont les équipements portatifs. La mise en œuvre de cette méthodologie conduirait à la même conclusion. Cependant, d'autres études complémentaires sont nécessaires par la suite afin de déterminer l'équipement portatif le plus approprié d'un point de vue ergonomique et performance technologique. Une étude similaire est menée par Syberfeldt et al. (2017) afin de comparer sur la base d'un ensemble de facteurs, la lunette de réalité augmentée la plus performante.

1.2.2.2 Méthodologie proposée par Syberfeldt et al. (2017)

Dans le but de fournir aux compagnies manufacturières des lignes directrices pour une identification efficiente de la meilleure alternative parmi les multiples lunettes de réalité augmentée sur le marché, Syberfeldt et al. (2017) mettent sur pied un processus de sélection structuré et simple.

Le processus consiste en un tamis de 12 étages qui prend en entrée une vaste liste de lunettes et donne en sortie une unique lunette : la meilleure des lunettes. La liste est constituée en répertoriant toutes les lunettes qui sont sur le marché. Chacun des étages du tamis se rapporte à un des 12 critères de comparaison qui sont respectivement : masse, champ de vision, autonomie de la batterie, optique, interface de programmation ouverte, audio, contrôle,

processeur, stockage, mémoire de traitement et connectivité. Pour chacun de ces critères, un seuil d'acceptabilité est fixé.

L'algorithme d'exécution à chaque étape est le suivant :

- Éliminer toutes les lunettes qui ne satisfont pas le seuil d'acceptabilité. Par exemple en fixant le seuil d'acceptabilité de la masse à 100 grammes, Syberfeldt et al. (2017) éliminent d'entrée de jeu toutes les lunettes dont la masse est supérieure à 100 grammes.
- Pour les lunettes retenues, les classer par ordre décroissant de performance par rapport au critère de comparaison. Par exemple pour le critère masse les lunettes sont classées de la plus légère à la plus lourde.
- Passer à l'étage inférieur

La Figure 1.4 présente une application du processus de sélection de Syberfeldt et al. (2017) sur une liste de 12 lunettes. À chaque passage d'un étage à un autre, les lunettes ne satisfaisant pas les seuils fixés sont éliminées et le processus se termine au dernier étage du tamis et la lunette Epson BT-300 est retenue comme étant la meilleur parmi les 12 du départ.

Cette méthodologie de sélection est très limitée par son approche. Sa première limite est liée à l'ordonnancement des étages qui peut conduire à :

- Une élimination précoce d'une lunette prometteuse. En considérant par exemple, la masse comme le premier étage du tamis, une lunette technologiquement performante et disposant de tous les critères nécessaires pour être un support dans des tâches d'assemblage est éliminée d'entrée de jeu si sa masse est supérieure au seuil défini.
- Une élimination tardive ou la sélection finale d'une lunette obsolète. En choisissant de placer le critère de connectivité au dernier étage, il est possible de retrouver à ce niveau du tamis avec uniquement des lunettes ne possédant pas l'option de se connecter aux autres équipements ou à la base de données par wifi ou par Bluetooth. Ce qui fait en sorte qu'au

sortir du processus de sélection, soit aucune lunette n'est sélectionnée soit une c'est une lunette inutilisable qui l'est.

La deuxième limite de cette approche est liée à l'utilisation des seuils d'acceptabilité pour l'élimination des lunettes. En procédant de cette façon, l'algorithme entraine l'élimination directe des lunettes sans tenir compte de l'influence que peuvent avoir certains critères sur d'autres. Au lieu de procéder à des éliminations à chaque étape, il serait plus pertinent d'attribuer un poids à chaque critère et de procéder aux choix de la meilleure lunette en considérant tous les critères ensemble.

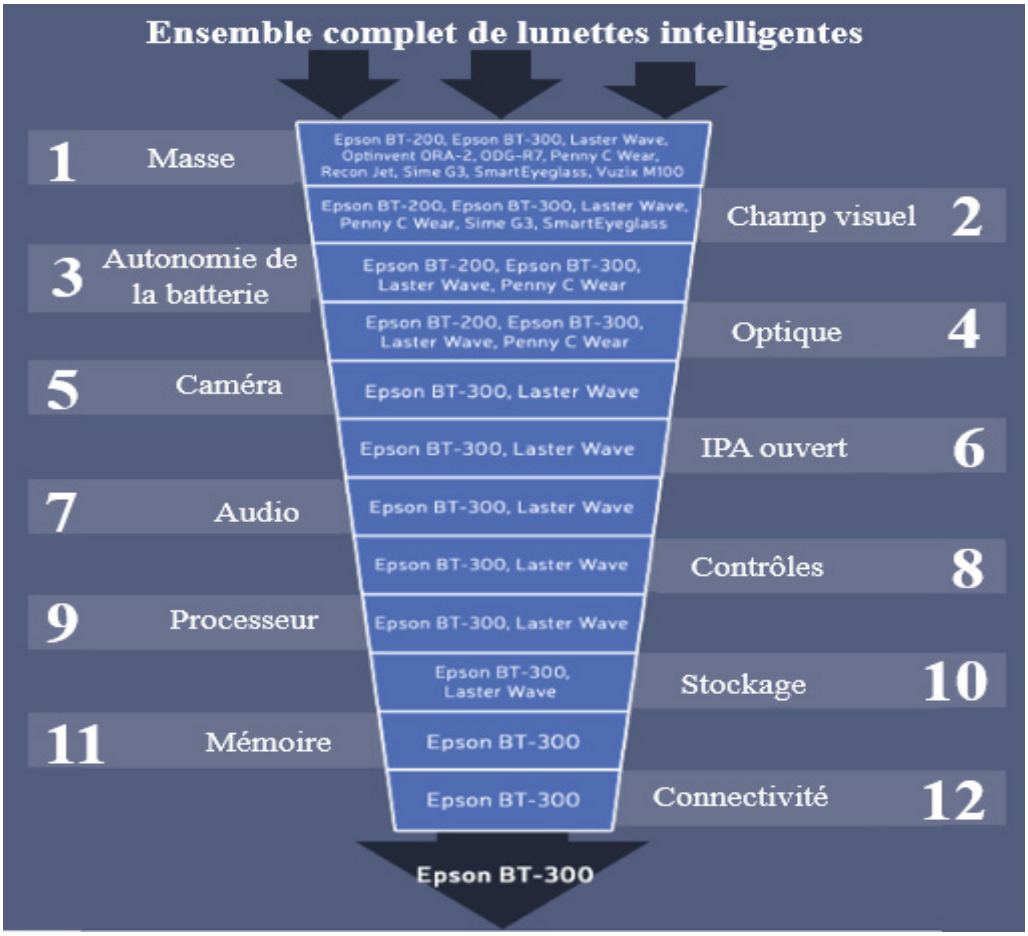


Figure 1.4 Processus de sélection mis en œuvre sur 12 lunettes

Tirée et adaptée de Syberfeldt et al. (2017)

1.3 Équipements d'assistance informationnelle

Avec l'évolution industrielle sans cesse grandissante et l'expansion de la personnalisation de masse, les entreprises manufacturières produisent de plus en plus de variantes de produits avec une complexité croissante des processus d'assemblage (Aheleroff, Mostashiri, Xu, & Zhong, 2021). De ce fait, le technicien d'assemblage est contraint à traiter et mémoriser une quantité importante d'informations relatives aux multiples produits (Fast-Berglund, Fässberg, Hellman, Davidsson, & Stahre, 2013 ; Funk & Schmidt, 2015 ; Petzoldt et al., 2020). Ils sont ainsi exposés à un stress et une charge de travail mentale plus importante. Afin d'éviter la baisse de la productivité qui en résulte (Bornewasser et al., 2018), une solution déjà démontrée viable est l'intégration des systèmes d'assistance informationnels dans les processus d'assemblage.

Un système d'assistance peut être défini comme étant *un outil permettant de soutenir ou de rehausser les capacités ou les compétences d'un travailleur par la transmission d'informations, l'assistance perceptuelle de l'information et le support à la décision* (Nadeau, 2019). Il est implémenté dans un système de travail des assemblages complexes dans le but d'améliorer la qualité et l'efficience de la productivité (Romero, Stahre, & Taisch, 2020 ; Stecken, Linsinger, Sudhoff, & Kuhlenkötter, 2019), d'accélérer les processus tout en évitant les erreurs et d'améliorer l'ergonomie cognitive et le bien-être des travailleurs (Petzoldt et al., 2020).

1.3.1 Technologie de base des équipements d'assistance informationnelle récente

Les équipements d'assistance cognitive implémentés en industrie sont pour la plupart basés sur la technologie de réalité étendue (RE). La réalité étendue est un terme général qui englobe la réalité virtuelle (RV), la réalité augmentée (RA) et la réalité mixte (RM) (Rauschnabel, Felix, Hinsch, Shahab, & Alt, 2022). La RV permet d'immerger un individu dans un environnement artificiel généré par l'ordinateur, totalement distinct du monde réel et dans lequel l'individu peut interagir avec les éléments qui s'y trouvent (Faisal, 2017). La RA quant

à elle consiste en la superposition du contenu numérique dans l'environnement réel (White, Schmidt, & Golparvar-Fard, 2014). Enfin, la RM est une extension de la RA, car elle permet également au contenu numérique d'interagir avec l'environnement réel. Les équipements d'assistance basés sur la RE sont regroupés en trois groupes dépendamment de la distance entre le contenu numérique affiché par l'équipement et l'humain. Ainsi Fang et al. (2023) distingue les projecteurs d'instructions, les visiocasques et les écrans mobiles. Dans la suite du document, afin d'alléger le texte, le terme RA sera utilisé pour faire référence à la fois la RA et la RM.

1.3.2 Catégorie d'équipements d'assistance utilisés dans le domaine des assemblages complexes et basés sur la RA

Pour des cas d'applications de la RA dans les activités d'assemblage complexe, l'on relève principalement dans la littérature des équipements tels que les écrans mobiles, les visiocasques et les projecteurs d'instructions (C. Chen et al., 2021 ; Fang et al., 2023 ; Mengoni, Ceccacci, Generosi, & Leopardi, 2018 ; B. Wang, Zheng, Wang, Fang, & Wang, 2024).

1.3.2.1 Projecteur d'instructions

Il existe une multitude de variantes de systèmes de projecteur ayant tous la même fonction qui est de projeter les instructions et les données d'assemblage sur le plan de travail ou directement sur l'équipement assemblé (C. Chen et al., 2021). Le MotionEAP conçu par Funk et Schmidt (2015) est une des variantes les plus simples sur le plan de constitutions ou d'équipements. Il est constitué d'un projecteur et d'une caméra de profondeur montés sur un support au-dessus de l'espace de travail. L'équipement est préalablement entrainé en enregistrant l'exécution du processus d'assemblage par un expert afin d'avoir une base de comparaison. Il fournit une assistance cognitive au travailleur grâce au système optique Pick-by light qui met en évidence les composants à choisir pour l'étape d'assemblage en cours tout en indiquant le lieu où le composant doit être installé. Grâce aux données de profondeur fournies par la caméra, l'équipement compare l'exécution de la tâche de l'employé avec la base de comparaison et en

cas d'erreur, le projecteur informe le travailleur non seulement à travers des voyants clignotants, mais également en projetant un message d'erreur.

Une variante du MotionEAP développé en Allemagne par Kosch, Kettner, Funk, et Schmidt (2016) fournit une assistance cognitive plus élaborée et plus adaptée aux assemblages complexes. En effet, en plus du système Pick-by light, pour chaque étape d'assemblage, il projette également sur le plan de travail une vidéo de l'exécution de l'assemblage par une personne plus expérimentée. Ces deux variantes de projecteurs d'instructions se limitent uniquement à l'amélioration de l'ergonomie cognitive et de l'efficacité des techniciens d'assemblage.

L'évolution technologique a permis à Mengoni et al. (2018) de développer un système plus développé (*Voir* Figure 1.5) ne se limitant pas uniquement à l'amélioration de l'ergonomie cognitive, mais aussi à la prévention et l'amélioration de l'ergonomie physique.

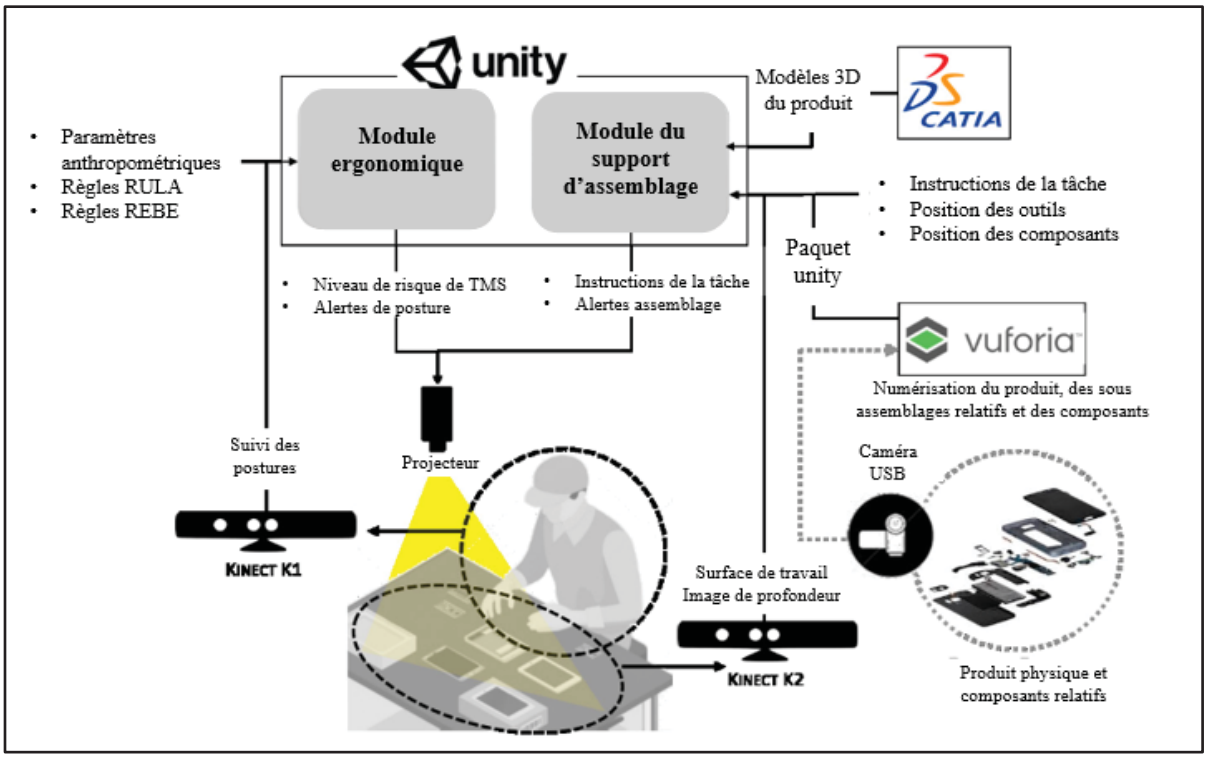


Figure 1.5 Architecture du système de projecteur d'instructions
Tirée et adaptée de Mengoni et al. (2018)

Ce système offre plusieurs fonctions d'utilisabilité, elle transmet en temps réel les instructions d'assemblage, fournit des alertes en cas de potentiel risque de sécurité des travailleurs et elle identifie les postures pouvant favoriser le développement des TMS. La particularité de ce système est qu'en plus de supporter le travailleur en le guidant dans ses tâches d'assemblage, il permet également de suivre le travailleur dans ses différents mouvements et d'identifier les postures pouvant conduire au développement des TMS et de suggérer au travailleur de modifier sa posture.
Ce système fonctionne grâce à une application développée par Unity et comportant deux modules :

- Le module ergonomique chargé de l'évaluation des postures adoptées par le travailleur et de la suggestion des postures ergonomiques à adopter. La mesure des paramètres anthropométriques du travailleur est réalisée grâce à la caméra de profondeur Kinect K1 et les suggestions des postures ergonomiques sont projetées directement sur le plan de travail grâce au projecteur.

- Le module support d'assemblage permet grâce à une synergie entre la caméra de profondeur Kinect K2, le scanneur d'objet Vuforia et les modélisations 3D des objets par Catia V5 de fournir les instructions d'assemblage en réalité augmentée. Pour chaque séquence d'opérations, les informations textuelles sont projetées sur le plan de travail et les modèles virtuels des composants sont projetés directement dans les zones où ils doivent être installés.

En général, les projecteurs d'instructions comparés aux autres types de systèmes basés sur la RE présentent les meilleures performances ergonomiques pour les travailleurs (Fang et al., 2023). En effet, ils ne nécessitent pas un port d'équipement supplémentaire, en revanche, l'implémentation d'un tel équipement nécessite que le poste de travail soit fixe et spacieux.

Tableau 1.2 Avantages et limites du système de projecteur d'instructions

Avantages	Limites
- Les mains et la tête du technicien sont libres - Interactions mains libres - Possibilité de suivi et d'amélioration de la posture du travailleur	- Sensible à la luminosité du lieu de travail : une luminosité élevée affecte la visibilité du contenu virtuel affiché - L'installation et la calibration de l'équipement peuvent nécessiter un temps supplémentaire et l'expertise de techniciens appropriés - Il convient uniquement aux postes de travail fixes et spacieux. - Exige dans certains cas le port de lunettes de sécurité (cas où le système utilise des lasers pour projeter les instructions)

1.3.2.2 Les visiocasques

Les visiocasques sont des dispositifs d'affichage tels que les lunettes intelligentes ou les casques de RV et RA qui se portent au niveau de la tête (C. Chen et al., 2021). Ils trouvent leurs applications dans divers domaines tels que le divertissement, la santé, le secteur industriel.

Les visiocasques peuvent être utilisés afin de permettre une communication mains libres entre le travailleur sur le terrain et l'expert à distance. Grâce à la transmission en temps réel des images et des vidéos par le visiocasque, l'expert est en mesure de guider aisément à distance le travailleur par des instructions vocales ou visuelles (images, textes, vidéos, modèles 3D) (Aranda-García et al., 2022). En outre, ils permettent également aux techniciens de visualiser les séquences du processus d'assemblage, étape par étape, au moyen des modèles 3D maniables, des animations et des instructions textuelles et contextuelles ainsi que les différents détails techniques (Caricato et al., 2014 ; Vidal-Balea, Blanco-Novoa, Fraga-Lamas, Vilar-Montesinos, & Fernández-Caramés, 2020). Les visiocasques ont ainsi un effet significativement positif sur la charge mentale des travailleurs (S. Kim, Nussbaum, & Gabbard, 2019 ; Xiao, Duan, & Zhang, 2018).

Il existe diverses classifications des visiocasques; Fang et al. (2023) les classes en deux catégories selon le mode de fonctionnement (*Voir* Figure 1.6) :

- Les visiocasques à vidéo transparent (video see-through (VST)) : les éléments virtuels sont intégrés dans la vidéo enregistrée en temps réel par la caméra incorporée et l'ensemble est transmis au travailleur via un écran opaque. Le travailleur ne voit pas directement l'environnement réel, ce qui peut parfois le stresser, et il y a également des risques d'erreurs liés au délai de diffusion par la caméra. En effet le délai existant entre les mouvements du travailleur et la perception de l'environnement réel par la caméra peut causer des erreurs lors de la superposition des éléments virtuels dans l'espace de travail.

- Les visiocasques à optique transparente (optical see-through (OST)) : ils sont les plus utilisés, car contrairement à la première catégorie, visiocasques OST possèdent un écran transparent et permettent ainsi au travailleur d'avoir une vue directe de l'environnement réel. Ils fournissent également les meilleures résolutions graphiques et de nombreuses fonctions interactives pour une meilleure assistance des travailleurs.

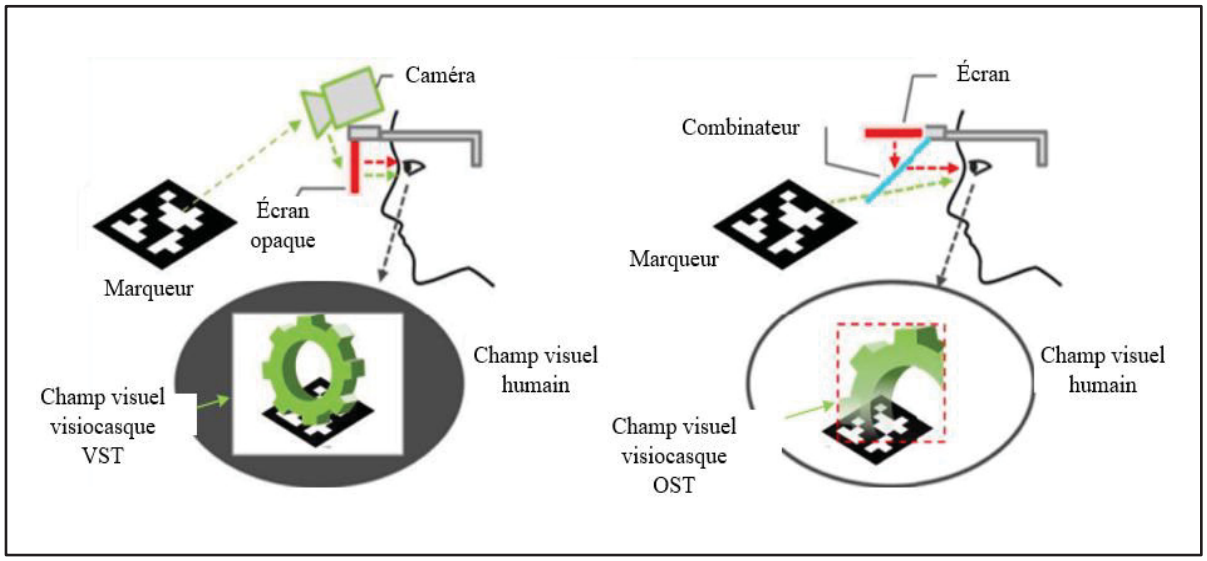


Figure 1.6 Les groupes de visiocasque : en (a) visiocasque VST et en (b) visiocasque OST
Tirée et adaptée de Fang et al. (2023)

Tableau 1.3 Avantages et limites du système des visiocasques

Avantages	Limites
- Téléassistance possible - Ils conviennent aux postes de travail fixes et mobiles - Le contenu virtuel est affiché dans le champ visuel du travailleur - Offre divers modes d'interactions - Meilleure interaction avec le contenu virtuel - Utilisations diverses en industrie autres que celle du guidage dans les processus d'assemblage	- Limites liées aux caractéristiques intrinsèques (autonomie de la batterie limitée, champ visuel réduit, délai de réponse, etc.) - Port d'équipement supplémentaire qui engendre une contrainte physique supplémentaire - Problème de confort

1.3.2.3 Les écrans mobiles

Les écrans mobiles sont principalement les tablettes et les téléphones intelligents. Ils sont utilisés comme équipements d'assistance cognitive pour guider les travailleurs dans les tâches d'assemblage.

Tableau 1.4 Avantages et limites du système des écrans mobiles

Avantages	Limites
- Cas d'utilisation universelle - Conviennent aussi bien aux postes fixes qu'aux postes mobiles - Coût réduit	- Précisions et stabilité limitées - Nécessitent l'utilisation d'une ou deux mains - Vision étroite

1.4 Étude de l'utilisabilité

L'introduction d'une nouvelle technologie dans un système de travail conduit généralement à une modification de l'organisation du travail, une reconfiguration des tâches, procédures, compétences et rôles des travailleurs (Bobillier-Chaumon & Dubois, 2010). Ceci ouvre donc la voie à deux possibilités pour les personnes cibles ainsi qu'à l'équipement : soit les travailleurs se conforment pleinement à la nouvelle configuration en acceptant de travailler avec le nouvel équipement et en se l'appropriant, soit ils refusent les changements et donc rejettent le nouvel équipement qui est perçu comme une menace. Il est de ce fait important de s'intéresser aux facteurs qui facilitent ou entravent l'adoption d'une nouvelle technologie, en d'autres termes l'étude de l'utilisabilité d'un nouvel équipement est essentielle avant de procéder à son intégration dans un système de travail existant.

1.4.1 Définition et cadre de travail

L'utilisabilité est définie par la norme ISO 9241-11 (2019) comme étant « *le degré selon lequel un produit ou un service peut être utilisé, par des utilisateurs spécifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficience et satisfaction, dans un contexte d'utilisation donné ».* Selon cette norme, l'étude de l'utilisabilité d'un produit ou d'un système a son importance, car lorsque qu'un produit s'avère avoir une :

- Utilisabilité faible, les utilisateurs cibles peuvent ne pas être intéressés ou être en mesure d'utiliser le produit.
- Utilisabilité suffisante, le produit peut être utilisé pour répondre au besoin tout en fournissant des avantages personnels, sociaux et économiques espérés par les utilisateurs.
- Utilisabilité élevée, le produit confère alors un avantage à ses utilisateurs.

L'utilisabilité d'un produit dépend de l'objectif que l'on cherche à atteindre avec le produit et de son contexte d'utilisation (*Voir* Figure 1.7). Ainsi, un même produit peut avoir des niveaux

d'utilisabilité différents dépendamment de son contexte d'utilisation ou des objectifs de son utilisation. Il est de ce fait très important, avant d'entamer l'étude sur un produit, de bien déterminer chacun des aspects spécifiés du cadre d'évaluation de l'utilisabilité de ce produit et les facteurs critiques de succès (Jordan, Bruce, Weerdmeester, & McClelland, 1996) :

- Spécifier l'objectif du partenaire industriel et des techniciens d'assemblage quant à l'introduction d'une lunette de RA/RM dans le système de travail;
- Définir les exigences de l'utilisabilité qui doivent être réunies pour que la lunette permette l'atteinte des objectifs;
- Lister et prioriser les exigences. Cette étape doit être réalisée en collaboration avec le partenaire industriel, il indique les points les plus pertinents sur lesquels il souhaiterait que l'on concentre l'étude de l'utilisabilité;
- Préparer et exécuter les tests d'utilisabilité : la préparation consiste en la formulation des points sur lesquels l'étude portera.
- Analyser les résultats et soumettre le rapport à l'industriel.

Jordan et al. (1996) et la norme ISO 9241-11 (2019) stipulent que l'évaluation de l'utilisabilité est réalisée en étroite collaboration avec le client qui fournit les précisions sur leur modèle mental et tous les aspects du processus de travail. De même, les tests d'utilisabilité doivent être réalisés avec les techniciens pour qui la lunette est destinée.

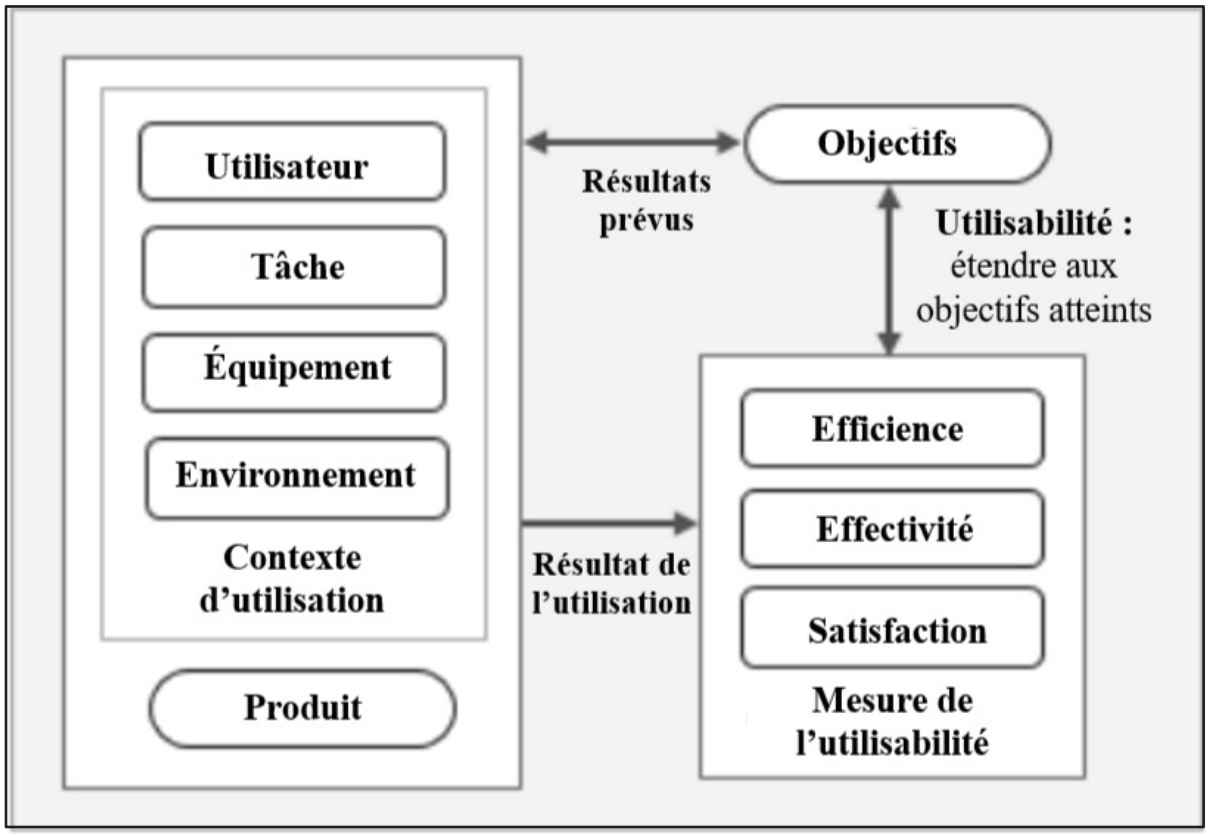


Figure 1.7 Cadre d'évaluation de l'utilisabilité selon la norme ISO 9241-11
Tirée et adaptée de Nik Ahmad et Hasni (2021)

1.4.2 Critères d'évaluation de l'utilisabilité

La norme ISO 9241-11 (2019) évalue l'utilisabilité selon trois critères principaux, dont l'efficacité, l'efficience et la satisfaction des utilisateurs cibles.

1.4.2.1 L'efficacité

Elle permet d'évaluer la capacité de l'utilisateur à accomplir correctement ses tâches (Nik Ahmad & Hasni, 2021) et se mesure à travers deux critères, dont la précision et le degré d'achèvement des tâches (ISO 9241-11, 2019). Le degré d'achèvement correspond au pourcentage de tâches que le produit permet à l'utilisateur d'achever sur un certain nombre de tâches prédéterminées. La précision quant à elle se rapporte à l'exactitude, le niveau de

correspondance entre les résultats fournis lors de l'utilisation du produit et les résultats attendus.

Dans le domaine industriel (précisément dans l'industrie de l'assemblage aéronautique) tout comme dans le domaine médical (précisément dans le domaine chirurgical) la précision et la fiabilité sont de mise. L'efficacité d'une lunette est significativement influencée par la précision avec laquelle elle superpose les données virtuelles au bon endroit sur les objets du monde réel (Pose-Díez-de-la-Lastra et al., 2022 ; Unger, Heinrich, Rick, Halama, & Chalopin, 2022).

Le manque de précision peut avoir pour origine la précision du produit lui-même, la difficulté d'utilisation du produit, l'interférence des éléments du produit avec la tâche de l'utilisateur et des décisions inappropriées prises sur la base d'éléments de sortie inexacts ou incomplets (ISO 9241-11, 2019)

1.4.2.2 L'efficience

Elle mesure la rapidité des utilisateurs à atteindre les objectifs avec les ressources et les outils mis à leur disposition (Nik Ahmad & Hasni, 2021). Moins un produit nécessite des ressources pour permettre l'atteinte des objectifs, plus il est efficient. Les ressources regroupent :

- Le temps : consacré pour atteindre l'objectif et le temps nécessaire pour l'apprentissage et la familiarisation de l'utilisateur avec le produit;
- L'effort humain fourni : il s'agit de l'effort physique et mental que l'utilisateur fournit pour la réalisation de ses tâches en utilisant le produit;
- Ressources financières : il s'agit des coûts liés à la mise en place et à l'utilisation du produit (coût de l'énergie, coûts de la connectivité, etc.).

1.4.2.3 La satisfaction des utilisateurs

Elle se définit comme étant « *le degré selon lequel les réactions physiques, cognitives et émotionnelles de l'utilisateur qui résultent de l'utilisation d'un système, produit ou service répondent aux besoins et attentes de l'utilisateur* » (ISO 9241-11, 2019). Les réactions physiques sont liées à la sensation de confort ou de gêne résultant de l'utilisation du produit. Les réactions émotionnelles quant à elles regroupent les attitudes et les préférences des utilisateurs qui peuvent être influencées par une utilisation passée d'un produit similaire ou par l'opinion des autres.

1.4.2.4 Autres critères d'utilisabilité

Selon Hudson, Matson-Barkat, Pallamin, et Jegou (2019), le degré d'immersion que la lunette offre à l'utilisateur a une influence sur sa performance à la tâche, à la satisfaction de l'expérience et à son intention de fidélité d'utilisation. De même, elle a un impact positif sur la motivation des utilisateurs et leur capacité à résoudre des problèmes (Huang, Rauch, & Liaw, 2010). Dès lors, nous considérons que le niveau d'immersion est un critère pertinent à évaluer dans le cadre de notre étude quant à l'utilisabilité de la Microsoft HoloLens 2 (MH2) et de la Magic Leap 2 (ML2). Cette évaluation pourra se faire en utilisant les questionnaires d'immersion Jennett et al.(2008) qui étudie la relation entre l'immersion et : le temps de complétion des tâches, le nombre de fixations oculaires dans le temps et le rythme d'interaction avec l'interface virtuelle. Ce questionnaire a été réalisé à partir des travaux et des résultats d'autres études menées par Agarwal et Karahanna (2000) et Brown et Cairns (2004). D'autres critères à l'instar de la facilité d'utilisation, le confort et l'acceptabilité pratique sont utilisés afin d'évaluer l'utilisabilité d'un produit (IAN & GALER, 1996).

Comme support à la norme ISO 9241-11 (2019) la méthode de la liste de contrôle proposée par Johnson (1996) peut être utilisée afin de couvrir d'autres aspects de l'utilisabilité de la lunette : la clarté visuelle, la consistance des données, la compatibilité avec les logiciels déjà présents en entreprise, flexibilité et contrôle, prévention et correction d'erreurs, orientation d'utilisation et soutien de l'utilisateur.

1.4.2.5 Quelques recommandations en utilisabilité

En dehors d'une amélioration de l'efficacité et de l'efficience dans les processus de travail, un facteur critique de succès repose sur le fait que la lunette doit améliorer la communication entre les différents départements et processus et pouvoir s'intégrer facilement dans l'organisation de travail (Jordan et al., 1996) déjà existante chez le partenaire industriel.

Shneiderman et al., (2016) émettent quelques recommandations vis-à-vis des interfaces utilisateurs :

- L'interface de la lunette doit être facile d'apprentissage et permettre le changement de langue pour accommoder tous les utilisateurs;
- L'interface de la lunette ne doit pas être encombrée ni fournir des retours insuffisants à l'utilisateur au risque d'engendrer du stress et de la frustration conduisant en fin de compte à une baisse des performances du travailleur et à l'insatisfaction d'utilisation;
- Normaliser la séquence des tâches : pour des tâches similaires ou dans des conditions similaires, la séquence d'exécution doit être la même ; cela permet de réduire la charge de travail cognitive de l'utilisateur.

Concernant les interactions avec la lunette, Brusie et al. (2015) dans leur étude d'utilisabilité stipulent que pour faciliter l'utilisation de la lunette :

- Les boutons de commande de la lunette doivent être positionnés de façon à permettre à l'utilisateur de les atteindre et de les distinguer aisément ;
- La commande vocale ne doit pas imposer que l'utilisateur retienne et répète de façon exacte les phrases, expressions ou mots configurés par défaut en commande vocale (pas de flexibilité).

Mentler, Wolters, et Herczeg (2015) suggèrent quant à eux que, pour une conception centrée sur l'utilisateur, l'utilisation supplémentaire d'un appareil de contrôle externe (manette, téléphone, etc.) permettrait d'améliorer les interactions entre l'utilisateur et la lunette. Avec ce mode d'interactions supplémentaire, l'utilisateur a plus de flexibilité sur les interactions et peut

choisir à sa convenance, le mode d'interactions le plus approprié selon le contexte dans lequel il se situe.

Pour ce qui est de la programmabilité, la lunette devrait idéalement avoir une interface de programmation d'application (IPA) ouverte (Brusie et al., 2015). Une IPA ouverte permettrait aux utilisateurs de concevoir leurs propres logiciels dépendamment du problème auquel ils font face et de les exécuter sur la lunette. Il permet également de réaliser des personnalisations de l'interface utilisateur, facteur important pour l'utilisabilité en application industrielle (Syberfeldt et al., 2017).

1.5 Question de recherche

La revue de littérature pertinente à l'étude a permis de relever les facteurs importants sur lesquels il faut porter une attention particulière lors d'une intervention HF/E ou lors de la conception des systèmes de travail en général, des postes de travail et des outils en particulier. Par ailleurs, nous avons également relevé qu'avec l'évolution sans cesse grandissante de la technologie, de nombreux équipements d'assistance des travailleurs ne cessent d'être développés et améliorés dans le but de rendre les tâches d'assemblage moins pénibles. Cependant, malgré cette multitude d'équipements, il existe très peu d'études scientifiques qui fournissent une méthodologie d'identification systématique d'un équipement adapté à un contexte bien identifié. Les deux méthodologies identifiées dans la littérature possèdent toutes deux des limites non négligeables qui empêcheraient leur pleine exploitation dans le contexte des assemblages complexes en espace restreint.

Par ailleurs, le taux élevé de la population active sujette aux TMS démontre que dans beaucoup de cas, les démarches de conception actuelles manquent souvent d'une intégration efficace de l'HF/E dès les premières étapes de développement, ce qui conduit généralement à des outils, tâches, postes de travail non adaptés aux besoins des utilisateurs.

La question de recherche que nous examinons dans le cadre de ce projet de recherche est la suivante :

« Quelle serait la démarche appropriée, pour une conception combinant un outil mécanique et numérique pour l'amélioration ergonomique d'un poste de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint ? »

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons adopté la méthodologie présentée au CHAPITRE 2.

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente l'objectif de notre étude et décrit la méthodologie utilisée pour l'atteindre. Il décrit par ailleurs les méthodes de collecte des données utilisées ainsi que les méthodes adoptées pour le traitement des données recueillies. Enfin, il présente la méthode utilisée pour tester la validité des résultats obtenus au terme de l'étude.

2.1 Cadre de l'étude

La présente étude a été initiée à la demande d'un partenaire industriel du secteur aéronautique. Ce partenaire dispose de plusieurs postes de travail destinés aux opérations de désassemblage, d'inspection, de maintenance et d'assemblage des turbines à gaz. Particulièrement, les opérations d'assemblage et de désassemblage des modules 8 de ces turbines sont réalisées dans deux postes. Le poste 1 (*Voir* Figure 2.1) qui est le poste d'assemblage est constitué de :

- Un support à roulettes sur lequel les éléments des modules 8 vont être placés et assemblés au fur et à mesure;
- Un siège dont la hauteur est réglée sur une plage limitée par le technicien en fonction de sa stature;
- Un pont roulant (non représenté sur la figure) permettant aux techniciens de lever et déplacer le support, le module lui-même ou ses pièces;
- Un établi sur lequel les techniciens disposent les outils de travail et certaines pièces avant de les assembler au module de la turbine;
- Un ordinateur que le technicien consulte afin d'avoir les données et les instructions liées à la tâche ou d'entrer des données une fois la tâche terminée;
- Une caisse à outils.

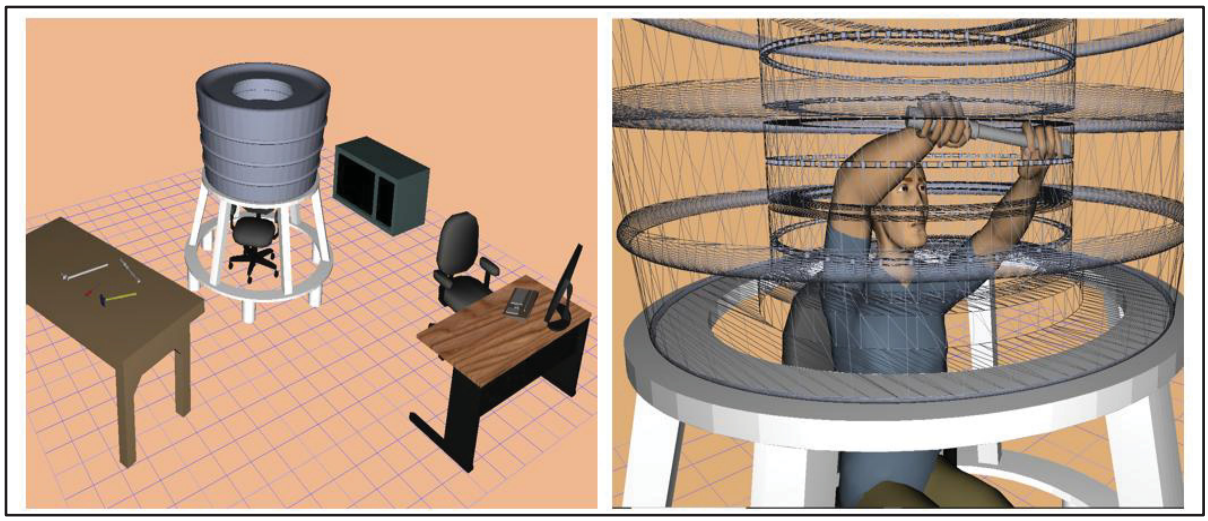


Figure 2.1 Poste d'assemblage des modules 8 des turbines à gaz

Le poste 2 (*Voir* Figure 2.2) qui est le poste de désassemblage est constitué de :

- D'un support à colonnes hautes sur lequel le module 8 est positionné et maintenu fixe grâce à des brides mécaniques;
- D'un iris mécanique (non représenté sur la figure). Il s'agit d'un système mécanique constitué de plaques assemblées en un cercle au niveau du sol afin de recouvrir une cave. Son ouverture et sa fermeture sont actionnées par un technicien grâce à une manette située dans le poste de travail;
- D'un pont élévateur souterrain (non représenté sur la figure) contenu dans la cave en dessous de l'iris mécanique. Il est actionné par un technicien après ouverture de l'iris afin de régler la hauteur de l'ensemble support à colonnes hautes - module 8 par rapport au sol;
- D'un escabeau permettant au technicien d'atteindre la hauteur de travail pour le déboulonnage;
- D'un ordinateur que le technicien consulte afin d'avoir les données et instructions liées à la tâche ou d'entrer des données une fois la tâche terminée;
- De deux établis sur lesquels les techniciens disposent les outils de travail et certaines pièces après les avoir désolidarisées du module 8;
- D'une caisse à outils (non représenté sur la figure);

- D'un pont roulant (non représenté sur la figure) permettant aux techniciens de soulever et déplacer le support, le module lui-même ou ses pièces après désassemblage.

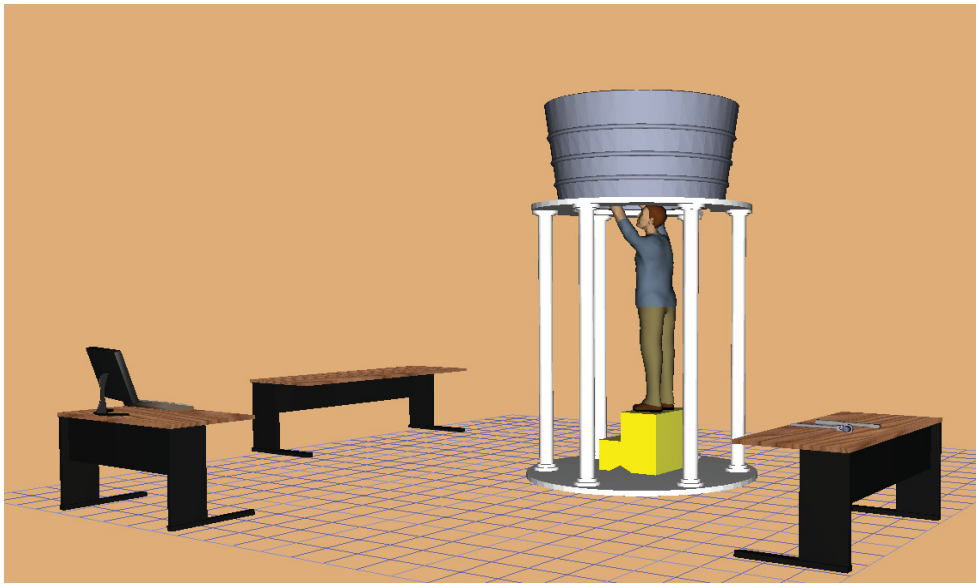


Figure 2.2 Poste de désassemblage des modules 8 des turbines à gaz

Aux postes 1 et 2, les pièces lourdes sont transportées du module 8 aux établis (lors du démontage) ou des établis au module 8 (lors du montage) grâce aux ponts roulants présents dans ces postes de travail.

La Figure 2.3 présente le système de travail d'assemblage et désassemblage du module 8 de la turbine à gaz. Les tâches sont exécutées par deux techniciens qui communiquent régulièrement afin de se synchroniser. L'un des techniciens est le principal travailleur et l'autre lui apporte du soutien tel qu'actionner les éléments des postes de travail grâce aux manettes, fournir les outils de travail, fournir un éclairage de support grâce à une lampe torche. Les interactions entre les deux techniciens et entre les techniciens et les outils et équipements sont sujets à de nombreuses influences de l'environnement de travail. L'intensité de l'éclairage, les bruits, la température et les produits chimiques contenus dans les pièces mécaniques sont les principales influences qui peuvent être notées.

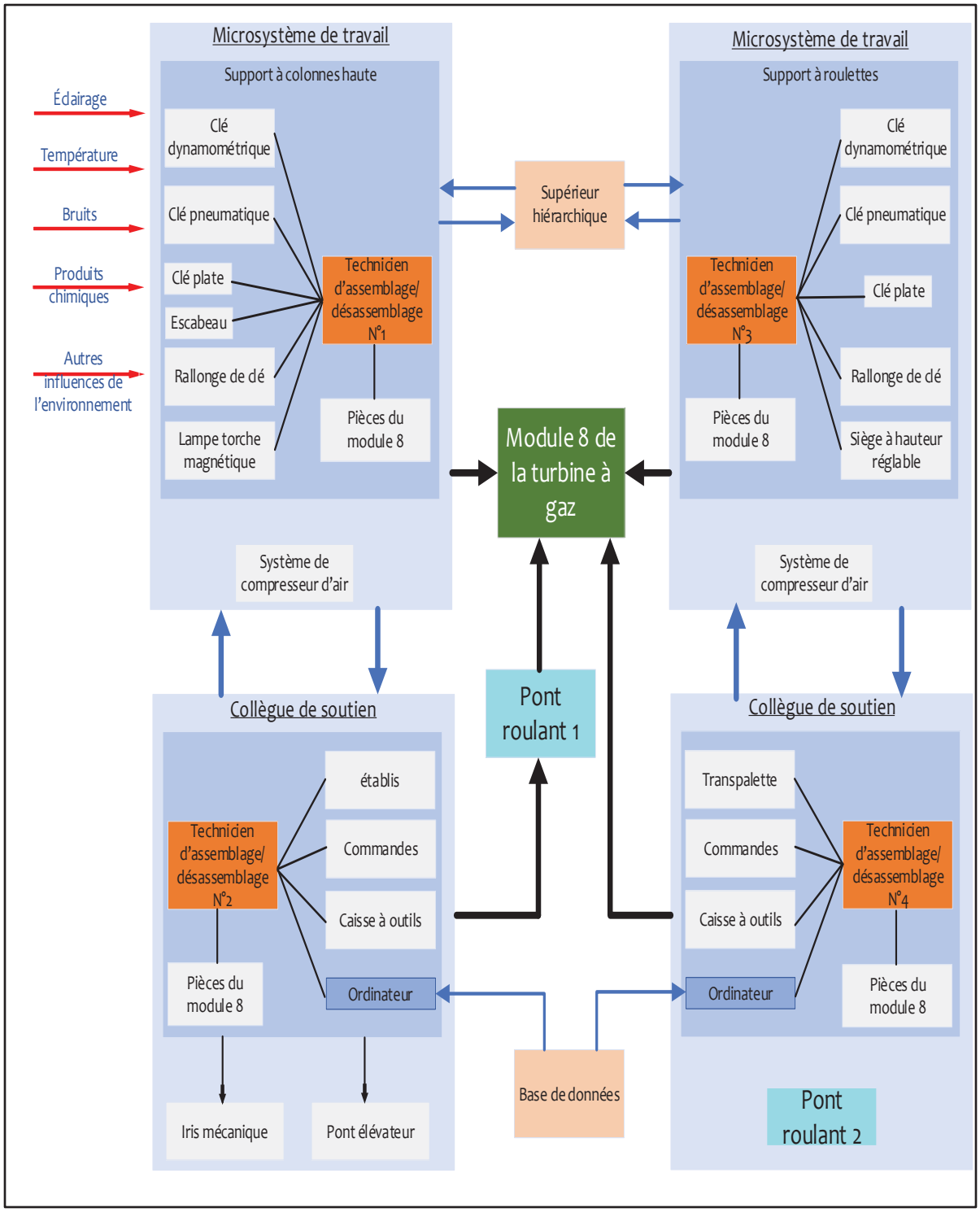


Figure 2.3 Système de travail d'assemblage et désassemblage du module 8 d'une turbine à gaz chez le partenaire industriel

Le poste 1 est celui ayant servi à l'étude de cas durant la phase de validation de notre démarche. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ce poste car c'est à ce niveau que les accidents de travail étaient les plus fréquents tel que signalé par le partenaire. Les assemblages effectués à ce poste se déroulent à l'intérieur des modules de la turbine et se caractérisent principalement par un manque d'espace ce qui conduit à une faible ergonomie du poste et l'adoption des postures contraignantes. Par ailleurs, le partenaire a explicité qu'à ce poste, les techniciens sont fréquemment victimes de blessures par choc entre les parois internes de l'espace de travail et leurs coudes, bras et tête durant l'exécution du boulonnage. Aussi, compte tenu de la configuration du poste, il est difficile pour le technicien déjà installé dans le module d'une turbine, d'accéder aux instructions et données de travail qui se trouvent dans l'ordinateur situé plus loin. En plus de consulter les instructions de travail, le technicien utilise régulièrement cet ordinateur pour :

- Examiner le flux de travail et prendre connaissance des modifications éventuelles qui y ont été apportées;
- Communiquer avec les autres techniciens impliqués dans le même projet ou avec ses supérieurs hiérarchiques;
- Documenter ses activités et rédiger des rapports à la fin de ses tâches;
- Solliciter une téléassistance en cas de difficulté ou de blocage dans l'exécution de ses tâches.

2.2 Objectif général

Les objectifs de cette étude avaient été explicités dès le départ par le partenaire industriel puis examinés et validés par notre équipe de recherche. Les données confidentielles recueillies chez le partenaire et les rencontres avec le comité de suivi du projet ont permis d'expliciter la problématique liée au poste 1 d'assemblage des modules 8 des turbines à gaz. Cette problématique peut se résumer en plusieurs questions :

- Comment réduire les blessures par chocs entre les travailleurs et les parois internes de la turbine durant la phase de serrage des boulons ?

- Comment améliorer les postures de travail des travailleurs dans le poste d'assemblage ?
- Comment fournir les instructions de travail aux techniciens directement dans le poste d'assemblage ?

Ainsi pour répondre à cette problématique, cette étude a pour objectif principal de proposer une démarche de conception d'équipement mécano numérique pour un poste de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint ; une démarche permettant dès la phase de conception de prendre en compte l'aspect ergonomique afin de minimiser différents risques de SST liés au système de travail et améliorer l'efficacité des travailleurs.

2.3 Approche méthodologique : recherche en conception (Design science research)

De manière générale, la conception renvoie à toute activité qui conduit au développement d'un produit qui répond à un besoin identifié. Le produit développé peut être physique (outil mécanique, équipement), virtuel (logiciel) ou un processus (démarche, méthode). La méthodologie dite de recherche en conception est celle que nous avons utilisée pour notre travail afin de proposer notre démarche. Elle est définie par Blessing et Chakrabarti, (2009) comme étant « *une approche et un ensemble de méthodes et de lignes directrices à utiliser comme cadre pour effectuer une recherche en conception ».*

Cette approche sied aux cas d'étude où le but est de développer un nouvel artéfact ou d'innover sur la manière d'utiliser un ou des artéfacts déjà existants. En effet, elle permet de rendre le processus de conception plus efficace et plus efficient, garantissant ainsi le développement d'artéfacts plus performants. La recherche en conception est un processus itératif de quatre étapes exécutables de façons parallèles et dont le point de départ peut être n'importe quelle étape du processus. La Figure 2.4 ci-dessous présente pour chaque étape de la méthodologie, les moyens utilisés ainsi que les résultats obtenus ou attendus au sortir de chacune des étapes. Les différentes étapes du DRM sont respectivement :

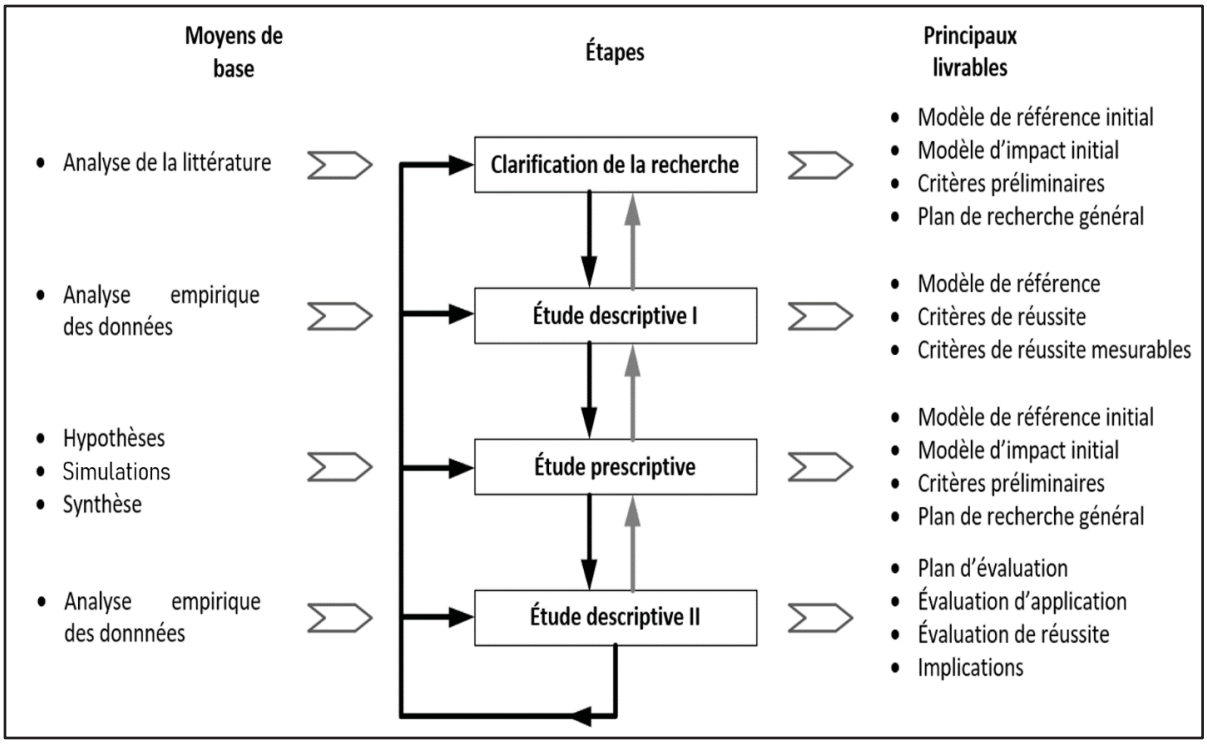


Figure 2.4 Méthodologie de la recherche en conception
Tirée et adaptée de Blessing et Chakrabarti (2009)

2.3.1 Clarification de la recherche

Cette première étape nous aide à définir clairement le sujet de notre étude. Concrètement, cela consiste à préciser le thème que nous allons explorer, les disciplines pertinentes à inclure, ainsi que les activités que nous devons mener pour avancer. C'est aussi le moment où nous identifions le domaine d'application potentiel de nos résultats.

Ensuite, il nous faut formuler un objectif de recherche à la fois précis et réalisable. Pour cela, nous nous appuyons sur les travaux existants afin de solidifier nos hypothèses de départ. Cette étape nous permet également de mieux cerner le problème que nous voulons résoudre (le modèle de référence initial) et de poser les bases d'une solution possible (le modèle d'impact initial). Enfin, nous établissons un plan de recherche qui guidera notre l'étude. Ce plan nous permettra de structurer nos idées et d'organiser notre travail de manière claire et efficace.

2.3.2 Étude descriptive I

À cette étape, nous approfondissons notre compréhension du problème en réalisant une description détaillée du modèle de référence initial. Pour cela, nous nous appuyons sur des études empiriques ou une analyse approfondie de la littérature pertinente. Cette description nous aide à identifier les facteurs clés sur lesquels nous devons intervenir pour atteindre notre objectif de recherche. L'étude descriptive prépare également les étapes suivantes en fournissant les critères nécessaires pour évaluer le modèle d'impact final.

2.3.3 Étude prescriptive

Avec une meilleure compréhension de la situation de départ, lors de l'étude prescriptive, notre objectif est d'abord de développer le modèle d'impact final en nous basant sur les modèles de référence et d'impact initiaux. Ensuite, en utilisant toutes les données recueillies jusqu'à présent, nous proposons une ou plusieurs solutions qui ciblent les facteurs clés identifiés, afin de corriger les problèmes et d'atteindre l'objectif de recherche.

2.3.4 Étude descriptive II

Cette étape consiste à évaluer l'artéfact (la démarche de conception) développé lors de l'étude prescriptive. Deux types d'évaluation sont possibles : l'évaluation d'application et l'évaluation de réussite. L'évaluation d'application permet de vérifier si l'artéfact est utilisable et s'il répond bien aux besoins qui ont conduit à sa création. L'évaluation de réussite, quant à elle, examine si les objectifs fixés ont été atteints et si le modèle d'impact a permis d'améliorer la situation par rapport à la situation initiale. Nous avons réalisé les deux types d'évaluations en procédant à une validation de notre démarche via une étude de cas. À la fin de cette étape, nous proposons également des pistes d'amélioration pour notre démarche.

2.4 Méthode de collecte des données

Comme stipulé à la phase de l'étude descriptive I du DRM, la construction d'une base de connaissances fondamentale liée aux domaines pertinents inhérents au sujet d'étude est cruciale et permet d'assurer la qualité de la recherche en conception. En effet c'est cette base de connaissance qui nous permettra de déterminer préalablement les outils et démarches susceptibles de convenir à la résolution du problème identifié. Ainsi, dans le cadre de notre étude, l'acquisition des connaissances fondamentales sur la conception d'outil, les équipements d'assistance informative et l'ergonomie nous permettra de relever les normes, les standards et les lignes directrices qui entrent en jeu dans la conception d'un équipement mécano numérique. La construction de cette base de connaissance fondamentale s'est faite au travers d'une recherche documentaire dans les bases de données scientifiques principalement Compendex 1884, Scopus 1960, INSPEC 1969 et Espace ÉTS - Mémoire et thèse.

Par ailleurs, étant donné que notre étude a été menée en collaboration avec un partenaire industriel dans le but de résoudre un problème précis dans un de leurs postes de travail, il nous a également fallu récolter un certain nombre de données sur site. Compte tenu du fait que nous ne disposons pas d'un certificat d'éthique, la collecte des données sur site s'est limitée aux données inertes. De ce fait, nous avons procédé principalement à la mesure des dimensions du poste de travail et des outils utilisés à ce poste, ainsi qu'à la réalisation de photographies détaillées de ces éléments.

2.5 Méthode de traitement des données

La littérature recueillie à travers les bases de données scientifiques est analysée de façon systématique en respectant les différentes étapes de l'analyse de contenu comme prescrit par Blessing et Chakrabarti (2009) dans le but de relever les tendances particulières à notre thème d'étude. Nous avons également réalisé une analyse descriptive de ces documents afin de résumer et organiser les différentes données pertinentes qui en sont issues.

Quant aux autres données issues de la mesure des dimensions et caractéristiques du poste de travail et des outils utilisés, le traitement de ces dernières consiste essentiellement en l'utilisation des logiciels de conception assistée par ordinateur. Avec le logiciel Catia V5, nous avons procédé à la modélisation du poste de travail et avons effectué des simulations d'assemblage avec le logiciel Jack 7.1. Ceci est réalisé d'une part dans le but de mieux cerner les risques liés aux tâches exécutées à ce poste et de dégager les différents points principaux sur lesquels il est nécessaire de porter une attention particulière. D'autre part, les simulations effectuées avec le logiciel Jack 7.1 sont dans le but de réaliser des évaluations ergonomiques des postures de travail adoptées par les techniciens durant l'exécution de leurs tâches d'assemblage.

2.6 Évaluation des résultats

Dans le cadre de la recherche en conception, la qualité de la recherche est assurée, entre autres, par la mise en œuvre de méthodes rigoureuses pour l'évaluation/validation des résultats. Dans le cadre de notre projet de recherche, la méthode d'évaluation que nous avons adoptée est une étude de cas. L'étude de cas est une méthode de recherche appropriée pour la description, la prédiction, l'explication et le contrôle des théories, des objets ou des processus inhérents à divers phénomènes (Gagnon, 2012). Elle permet de réaliser une analyse en profondeur des phénomènes et des processus en contexte réaliste et d'assurer une forte validité interne des résultats d'une étude. D'autre part, l'étude de cas permet de raffiner une théorie développée et d'en faire ressortir les limites.

CHAPITRE 3

RÉSULTAT (PARTIE 1) : LA DÉMARCHE

3.1 Démarche de conception d'équipement mécano numérique en milieu de travail

La démarche proposée dans cette section est basée sur la littérature et regroupe les éléments des concepts principaux abordés durant cette étude. Étant donné que l'étude est menée en collaboration avec un partenaire industriel, la démarche proposée est donc orientée vers la résolution des problèmes identifiés par le partenaire industriel.

3.1.1 Représentation graphique de la démarche

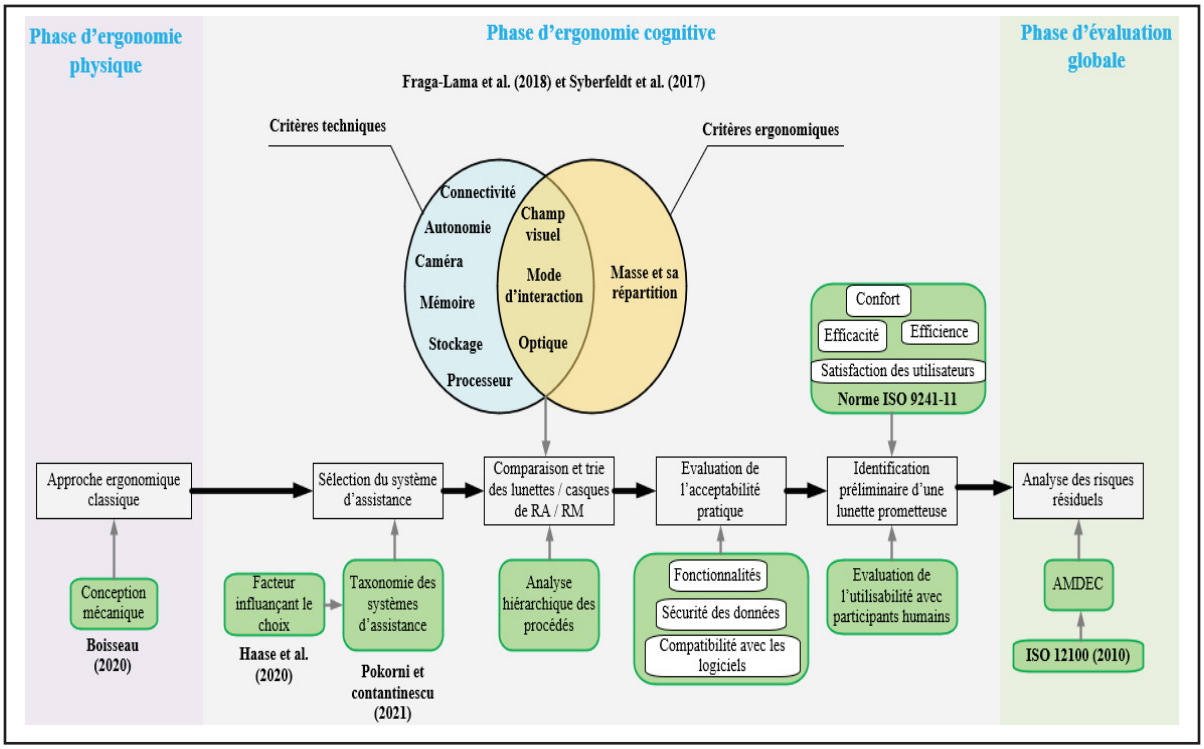


Figure 3.1 Démarche de conception proposée

3.1.2 Représentation textuelle de la démarche

La démarche de conception d'équipement mécano numérique présentée graphiquement à la Figure 3.1 est subdivisée en trois grandes phases ayant chacune pour but de résoudre les problèmes liés respectivement à l'aspect physique et cognitif de l'HF/E.

3.1.2.1 Phase réservée à l'ergonomie physique

Cette phase de la démarche de conception repose sur l'usage de l'approche ergonomique classique dont les différentes étapes sont détaillées sur la Figure 3.2. Elle a pour objectif principal la conception ou la reconception de la situation de travail pour la rendre compatible aux besoins et limitations du travailleur.

La phase de l'ergonomie physique peut éventuellement nécessiter la conception et l'intégration d'outils mécaniques dans le poste de travail pour atteindre les objectifs ergonomiques fixés. Pour la conception mécanique, nous suggérons d'utiliser la méthodologie de conception décrite par Boisseau (2016).

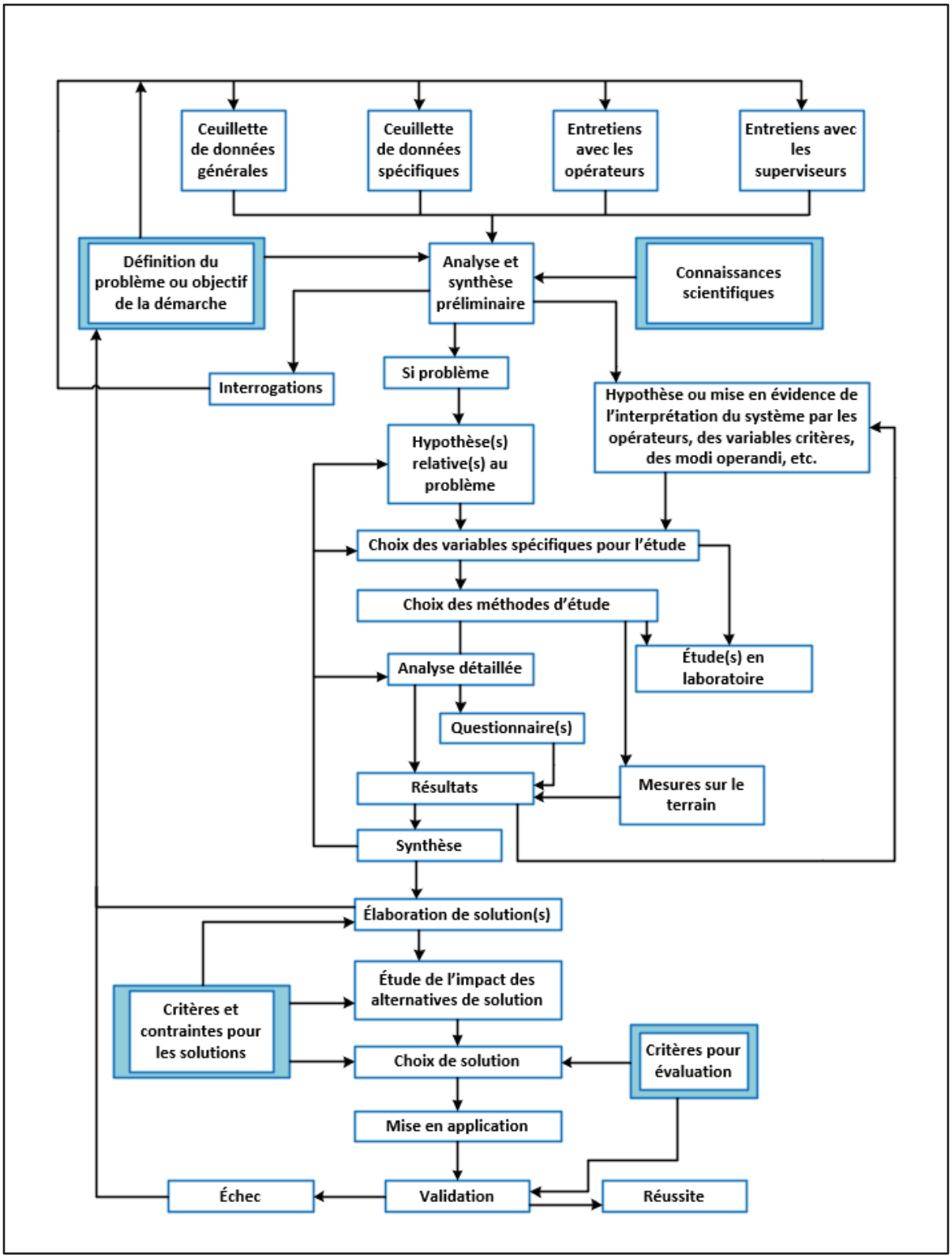


Figure 3.2 Démarche de l'approche ergonomique classique

Tirée de Gilbert R. (2004)

3.1.2.2 Phase réservée à l'ergonomie cognitive

Cette partie de la démarche est spécifiquement réservée à la sélection de l'équipement d'assistance cognitive. Elle est constituée de quatre étapes :

❖ Sélection du type d'assistance ou de la technologie de l'équipement d'assistance

Le choix de l'équipement d'assistance ne doit pas se faire en examinant la tâche de façon isolée, mais en prenant également en considération d'autres facteurs. Ces facteurs sont liés au système de travail, aux contraintes organisationnelles et aux caractéristiques individuelles des employés. Ce sont des facteurs pertinents exerçant une influence décisive sur l'orientation de la conception (choix et la conception de la technologie et les fonctionnalités à intégrer au système d'assistance). Selon Petzoldt et al. (2020), considérer les exigences et les besoins individuels des travailleurs lors de la conception d'un nouvel équipement permettrait de garantir son acceptabilité et son efficacité. Pour cela, Haase, Radde, Keller, Berndt, et Dick (2020) proposent un tableau de paramètres à prendre en compte (*Voir* ANNEXE III, p. 155) pour effectuer un tri préliminaire avec la taxonomie des systèmes d'assistance de Pokorni et Constantinescu (2021).

❖ Mise en œuvre de l'analyse hiérarchique des procédés (AHP).

Au sortir de la première étape, un type spécifique d'équipement d'assistance est retenu et la deuxième étape consiste à effectuer une comparaison multicritère de différentes alternatives. Considérant le fait que nous manipulons des données qualitatives et quantitatives, l'analyse hiérarchique des procédés (AHP) est la méthode qui a été retenue afin de nous fournir un support de décision. En prenant simultanément en compte de nombreux critères, l'AHP nous permettra d'obtenir aisément le poids de chacune des alternatives et donc de déterminer celle qui est à privilégier (Liu, Eckert, & Earl, 2020). Ces critères sont issus de la littérature scientifique principalement des travaux de Fraga-Lamas, Fernandez-Carames, Blanco-Novoa, et Vilar-Montesinos (2018) et de ceux de Syberfeldt et al. (2017).

❖ Étude de la valeur d'usage

Cette étape porte sur l'étude de l'acceptabilité pratique d'une ou des alternatives retenues à l'étape précédente. Il s'agit d'évaluer, entre autres, les fonctionnalités de l'outil, la compatibilité avec les logiciels utilisés dans l'entreprise et la question de la sécurité des données.

❖ Identification d'une lunette prometteuse

Il s'agit à cette étape d'impliquer des participants humains afin d'évaluer l'utilisabilité pratique de l'équipement retenu dans un contexte d'utilisation réelle. Il sera alors question d'évaluer entre autres l'efficacité, l'efficience et la satisfaction des utilisateurs finaux ainsi que la facilité d'utilisation de l'équipement. Cette évaluation est menée en suivant les recommandations de la norme ISO 9241-11 (2019)

3.1.2.3 Phase d'évaluation globale

Il s'agit de la dernière étape de la méthodologie proposée. Elle porte sur la réalisation de l'analyse des risques résiduels du poste de travail. Le but est de faire ressortir toutes les situations à risque présentes dans le système, leurs causes et leurs effets sur les travailleurs. L'outil utilisé ici est l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, leurs Effets et leur Criticité) avec l'appui de la norme ISO 12100 (2010) pour l'estimation du risque.

CHAPITRE 4

RÉSULTAT (PARTIE 2) : CAS D'ÉTUDE – PHASE DE L'ERGONOMIE PHYSIQUE

Ce chapitre sert de validation de la méthodologie proposée pour la conception d'outil mécano numérique en vue de l'amélioration ergonomique d'un poste de travail. De ce fait dans cette étude de cas il est question de mettre en application les différentes étapes de la phase de l'ergonomie physique de la démarche illustrée à la Figure 3.1 afin de répondre aux questions suivantes :

- Comment réduire les blessures par chocs entre les techniciens et les parois internes de la turbine durant la phase de serrage des boulons ?
- Comment améliorer les postures de travail des techniciens dans le poste d'assemblage ?

4.1 Phase d'ergonomie physique

4.1.1 Analyse et synthèse du problème

Le poste 1 présenté dans la Figure 2.1 est le poste d'assemblage des modules 8 des turbines à gaz. L'essentiel des tâches réalisées à ce poste est présenté dans la Figure 4.1. Nous nous intéressons particulièrement à la tâche de boulonnage des étages du stator et du rotor. Cette tâche est, selon le partenaire industriel, celle qui expose le plus le travailleur à des postures contraignantes des membres supérieurs et à un travail au-dessus du niveau du cœur. Le boulonnage est exécuté sur trois étages du module 8 :

- Le premier étage est constitué de 40 boulons;
- Le deuxième de 76 boulons;
- Le troisième de 80 boulons.

Le boulonnage se fait en deux phases (*Voir* Figure 4.2) : la phase de serrage initial qui s'étend du mouvement N° 2 au N° 20 et la phase de serrage final qui s'étend du mouvement N° 23 au mouvement N° 27.

Assemblage des éléments du module 8 **Détails des tâches**	Opération	Transport	Contrôle	Délai	Stockage
Prise de connaissance des instructions et des données de travail	○	⇨	□	●	▽
Déplacement du module au poste d'assemblage	○	➡	□	D	▽
Dépôt, stabilisation et immobilisation du module sur le support à roulettes grâce aux serre-joints	●	⇨	□	D	▽
Vérification des serres serre-joints	○	⇨	■	D	▽
Déplacements successifs des étages du stator et du rotor vers le poste d'assemblage	○	➡	□	D	▽
Dépôt de chaque étage sur le module	○	➡	□	D	▽
Alignement des alésages du module avec ceux de chaque étage déposé grâce à des coups de maillet	●	⇨	□	D	▽
Vérification de l'alignement des alésages	○	⇨	■	D	▽
Choix et préparation des outils de travail	●	⇨	□	D	▽
Contrôle de la présence de tout le nécessaire de travail (outils, boulons, écrous)	○	⇨	■	D	▽
Réglage la hauteur du siège	●	⇨	□	D	▽
Exécution du boulonnage de chaque étage du stator et du rotor	●	⇨	□	D	▽
Contrôle du boulonnage	○	⇨	■	D	▽
Installation des outils spéciaux pour le transport du module grâce au pont roulant	●	⇨	□	D	▽
Contrôle du montage	○	⇨	■	D	▽
Transport du module grâce au pont roulant	○	➡	□	D	▽
Stockage du module en attente des prochaines opérations dans le poste suivant	○	⇨	□	D	▼

Figure 4.1 Graphique d'analyse de processus d'assemblage du module 8 de turbine à gaz

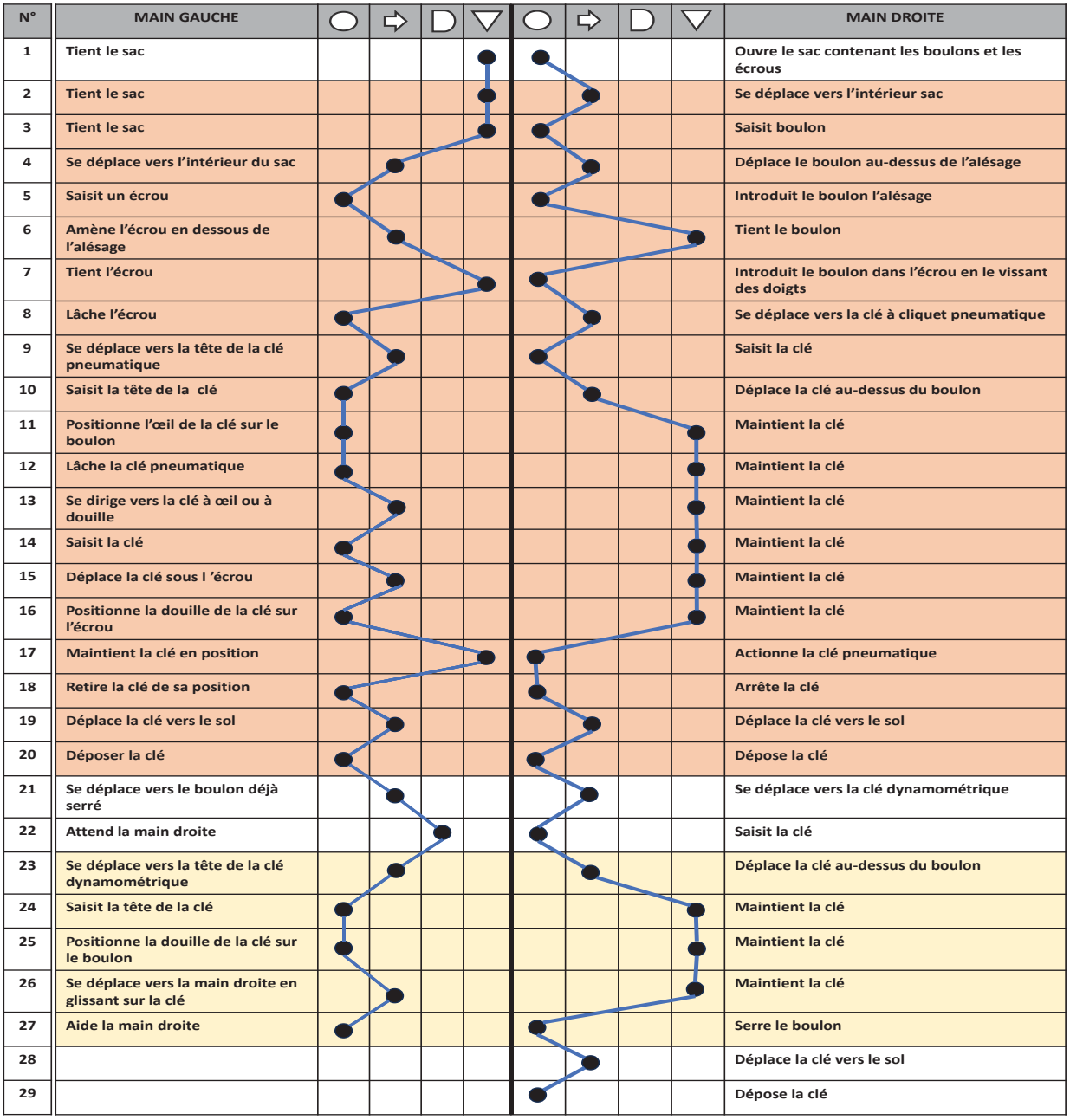


Figure 4.2 Graphique des mouvements simultanés des deux mains pour la tâche de boulonnage des étages du module 8

Les deux graphiques précédents sont des méthodes d'étude du travail dont la mise en place est détaillée dans International Labour Office (1981). Ces graphiques présentent respectivement la séquence des tâches exécutées dans le poste d'assemblage et la séquence d'actions exécutées durant la tâche de lors boulonnage.

Lors du boulonnage initial des étages de boulons, le technicien exerce un travail statique des bras au-dessus du niveau du cœur afin de maintenir les outils en position (*Voir* Figure 4.3) et un travail dynamique afin de résister au contrecoup engendré par la clé pneumatique lors du serrage. Le serrage initial est réalisé par l'utilisation combinée d'une clé pneumatique et d'une clé plate conventionnelle. Un risque supplémentaire auquel sont soumis les techniciens dans cette phase initiale de serrage provient de la clé pneumatique. La posture adoptée fait en sorte que la clé est située près de la tête du technicien, les mouvements brusques que les contrecoups de l'outil impliquent peuvent causer des chocs entre la poignée métallique de l'outil et la tête du technicien. Ces contre coups constituent également un facteur non négligeable de développement de TMS au niveau du système main-bras (Mandeville-Gauthier & Marchand, 2012 ; Rouleau, 2010).

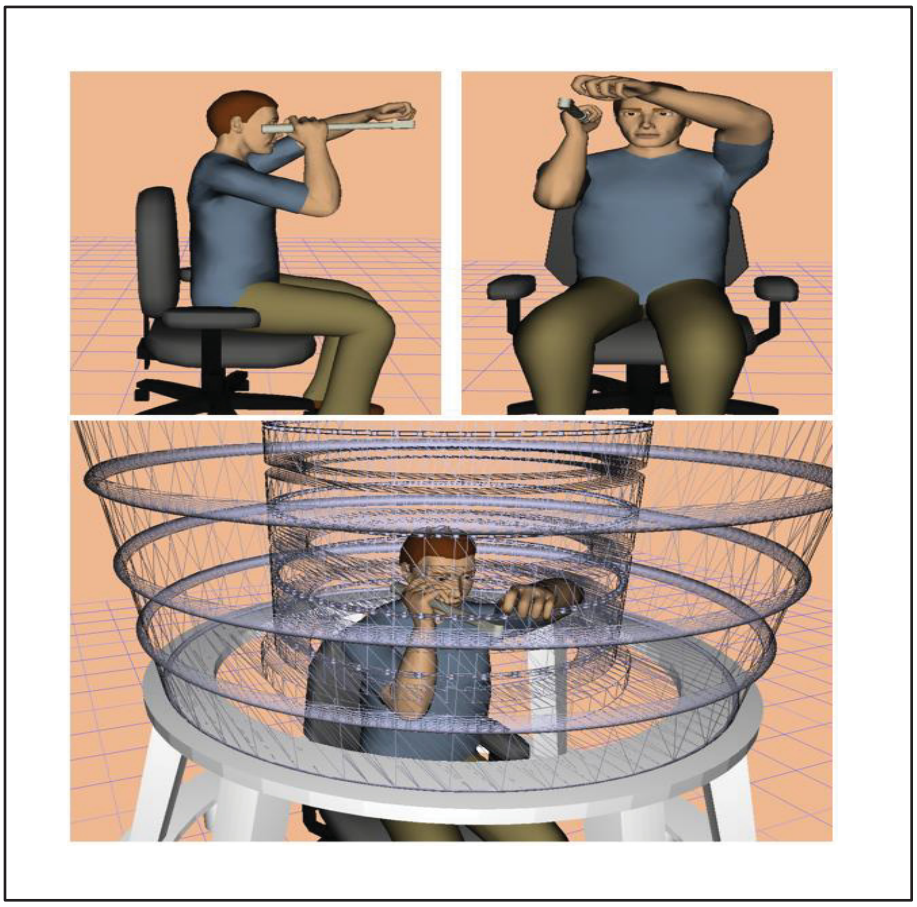


Figure 4.3 Posture des travailleurs en l'état actuel
lors de la phase du serrage initial

Les résultats de l'analyse ergonomique de la posture via la méthode RULA (Rapid Upper Limb Assessment) ont montré que les postures adoptées par les travailleurs à ce poste lors du boulonnage initial des différents étages du module 8 sont inacceptables du point de vue ergonomique et nécessitent une amélioration immédiate (*Voir* colonne score RULA ancienne posture du Tableau 4.10). L'élévation des bras pour atteindre les boulons, la rotation et la flexion du cou pour situer les boulons dans le champ visuel du technicien, la posture de l'épaule, la fréquence de travail et l'indice de force de manipulation de l'outil sont les principaux éléments qui ont grandement influencé les résultats de son étude.

En ce qui concerne le serrage final, il est réalisé par l'utilisation combinée d'une rallonge et d'une clé dynamométrique (*Voir* Figure 4.4) dont le couple de serrage est réglé conformément aux instructions de travail. Cette rallonge a l'avantage d'éliminer le travail des bras au-dessus du cœur et de ramener le technicien dans une posture plus acceptable principalement pour le premier étage.

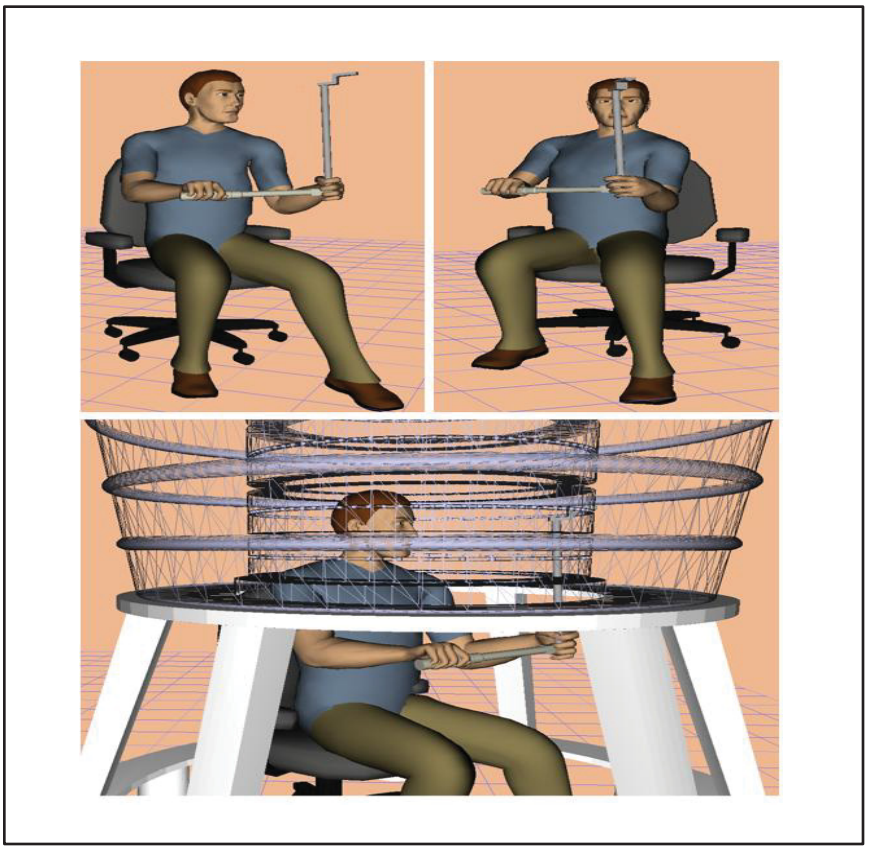


Figure 4.4 Posture des travailleurs en l'état actuel
lors de la phase du serrage final

Pour le deuxième et le troisième étage, principalement pour les techniciens ayant de petites statures, l'exécution du boulonnage va les contraindre à fléchir le cou et à avoir les membres supérieurs à l'intérieur de l'espace interne de la turbine. Par ailleurs, compte tenu de l'espace de travail disponible dans la turbine, et de la posture adoptée des bras pour exercer le couple nécessaire au boulonnage, il a également été relevé que les techniciens sont souvent sujets à des blessures causées par le choc entre les coudes et les parois de la turbine.

Par ailleurs, nous avons également relevé une interdépendance entre la position du boulon, celle des mains et la posture de la tête du travailleur. En effet, la disposition de la tâche et le problème d'espace restreint ne permettent pas au travailleur d'avoir une vue distincte sur l'outil et le boulon lors du positionnement de l'œil de l'outil sur le boulon (*Voir* Figure 4.5).

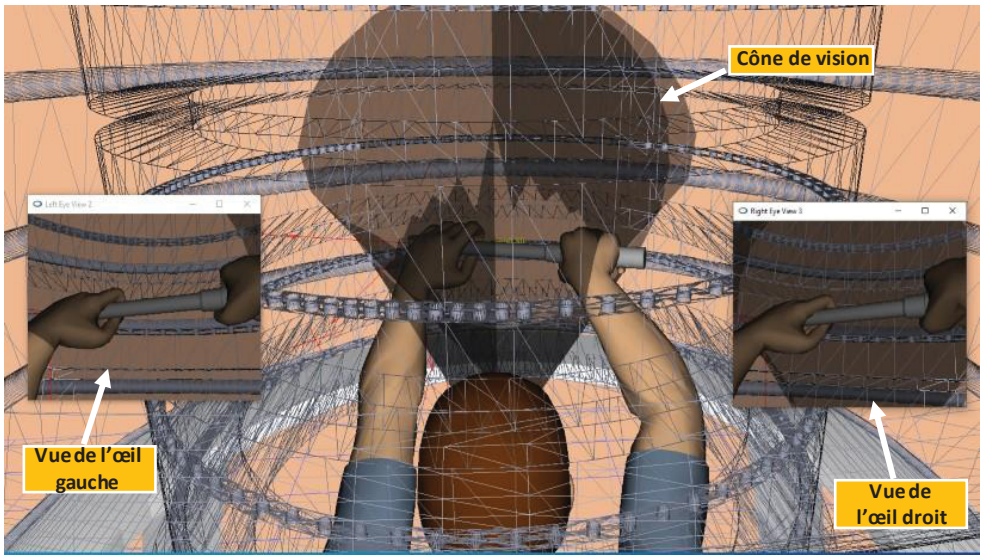


Figure 4.5 Cône de vision du travailleur lors du boulonnage du deuxième étage de boulons

L'analyse détaillée du problème d'espace de travail restreint nous a également poussés à nous intéresser à la détermination de la population admissible à travailler dans le poste d'assemblage. Compte tenu de l'exigüité de l'espace dans le poste de travail, il est à priori clair que le bassin de la population capable d'y exécuter le boulonnage est assez restreint. Pour avoir une estimation plus adéquate, nous avons effectué des simulations d'exécution du boulonnage avec le logiciel PLM Jack 7.1 avec des mannequins de la base de données North American Automotive (NA-AUTO). Au préalable, des mesures des différents éléments du poste de travail avaient été minutieusement effectuées chez le partenaire industriel. Ces mesures ont permis par la suite de modéliser sur le logiciel Catia V5 le poste de travail le plus fidèlement possible pour garantir des résultats de simulations satisfaisants.

Lors de la simulation avec 5e centile femme, nous avons réglé le siège à la hauteur minimale. En effet durant nos visites chez le partenaire industriel nous avons également eu à mesurer la hauteur maximale (55.5cm) et minimale (42.5cm) de la chaise utilisée dans le poste

d'assemblage. La simulation sur Jack 7.1 a permis de faire ressortir que cette chaise ne convient pas pour une femme du 5e centile ou moins. Lorsque le mannequin est assis sur le siège, ses pieds ne sont pas en appui sur le sol, il y a un écart d'environ 4.3cm entre la surface du sol et la plante de ses pieds (*Voir* Figure 4.6). Il est difficile d'exécuter un assemblage en position assise sans pouvoir prendre appui sur ses pieds afin de déployer l'effort nécessaire pour le boulonnage avec une clé. Ceci démontre la nécessité d'une modification du poste de travail pour accommoder les femmes du 5e centile ou moins.

La simulation avec le 95e centile homme a démontré une certaine difficulté voire une impossibilité de l'exécution de la tâche du boulonnage par des mannequins hommes. En effet, lors de la modélisation de la posture de travail, le logiciel Jack 7.1 a constamment signalé de fortes collisions (coloration jaune du mannequin et du module de la turbine) entre le mannequin et la turbine (*Voir* Figure 4.7). Ceci montre qu'un technicien homme appartenant au 95e centile homme ou plus ne peut être recruté par le partenaire afin de travailler dans l'assemblage de la turbine.

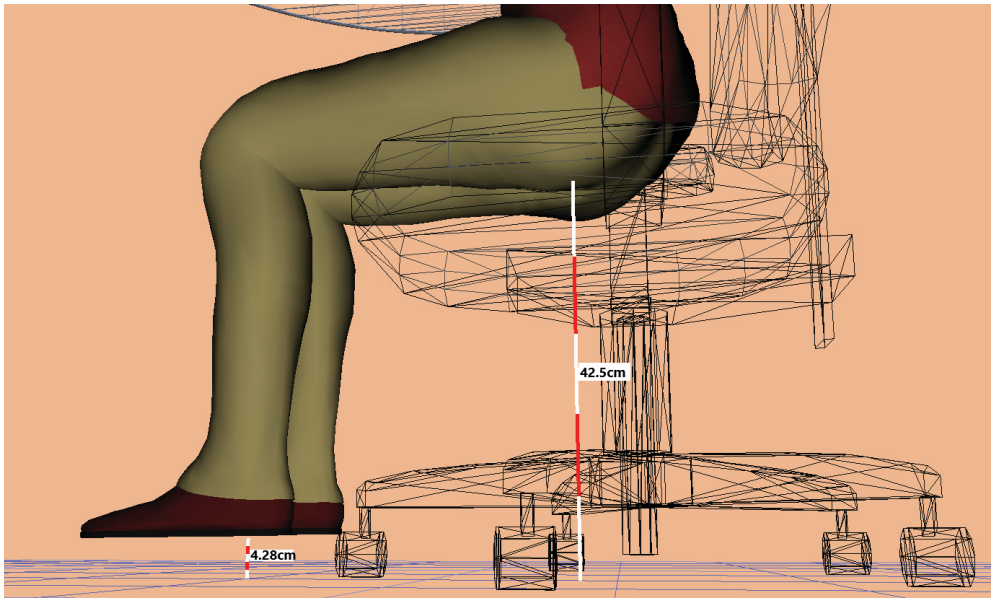


Figure 4.6 Mannequin 5e centile assis sur le siège réglé à la hauteur minimale

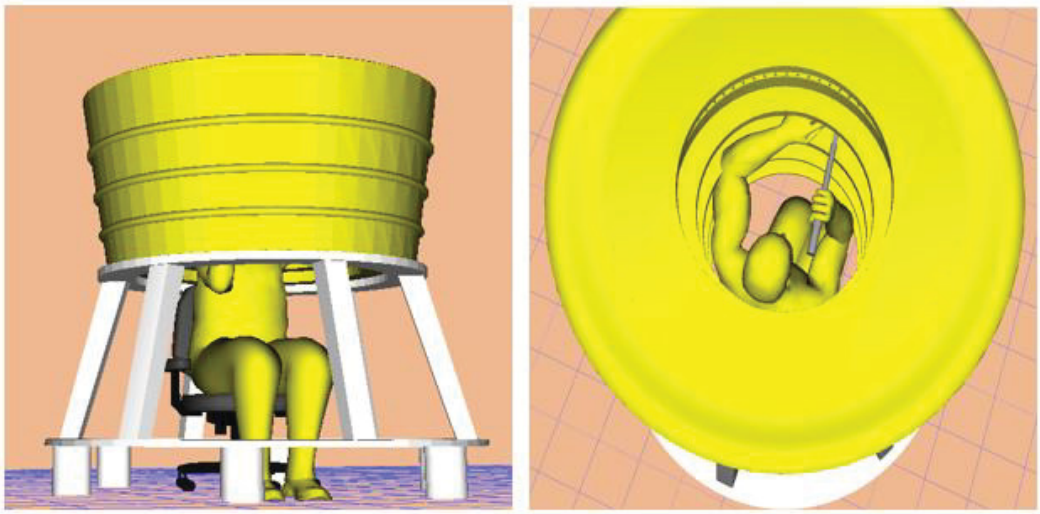


Figure 4.7 Détection de collision durant la simulation avec 95e centile homme exécutant le serrage initial

Compte tenu du fait que le 95e centile homme ne peut être considéré pour ce poste de travail, il est question de déterminer dès lors le centile maximal de la population d'hommes de la base de données NA-AUTO avec lesquels la simulation de la posture de travail peut être réalisée dans ledit poste sans qu'il n'y ait collision entre le mannequin et les parois de la turbine. Étant donné les limites du logiciel Jack 7.1, principalement la limitation par rapport aux centiles disponibles, nous avons décidé de migrer vers le logiciel Catia V5, qui présentait des solutions satisfaisantes par rapport aux limitations rencontrées sur Jack 7.1.

En modélisant dans Catia V5 la posture de travail avec différents centiles, ce qui en est ressorti est qu'entre le 50e et le 65e nous avons été capables d'insérer les mannequins dans le module et au-delà du 65e centile le mannequin rentrait beaucoup plus difficilement. Compte tenu de l'espace de travail disponible et l'utilisation d'outil d'assemblage, il est évident que les techniciens au-delà du 65e centile homme de la population canadienne ne peuvent pas travailler dans ce poste d'assemblage bien qu'ils puissent y entrer. Comme l'indique la fFigure 4.7, quel que soit la posture adoptée par le mannequin pour exécuter la tâche, le logiciel colore l'ensemble en jaune pour signaler les collision et intersections entre le mannequin et la turbine.

En résumé, il ressort de toutes ces simulations que le bassin de la population capable d'exécuter l'assemblage du module 8 dans le poste actuel avec de légères modifications est essentiellement situé entre le 5e centile femme (avec énormément de difficultés) et le 65e centile homme de la population canadienne.

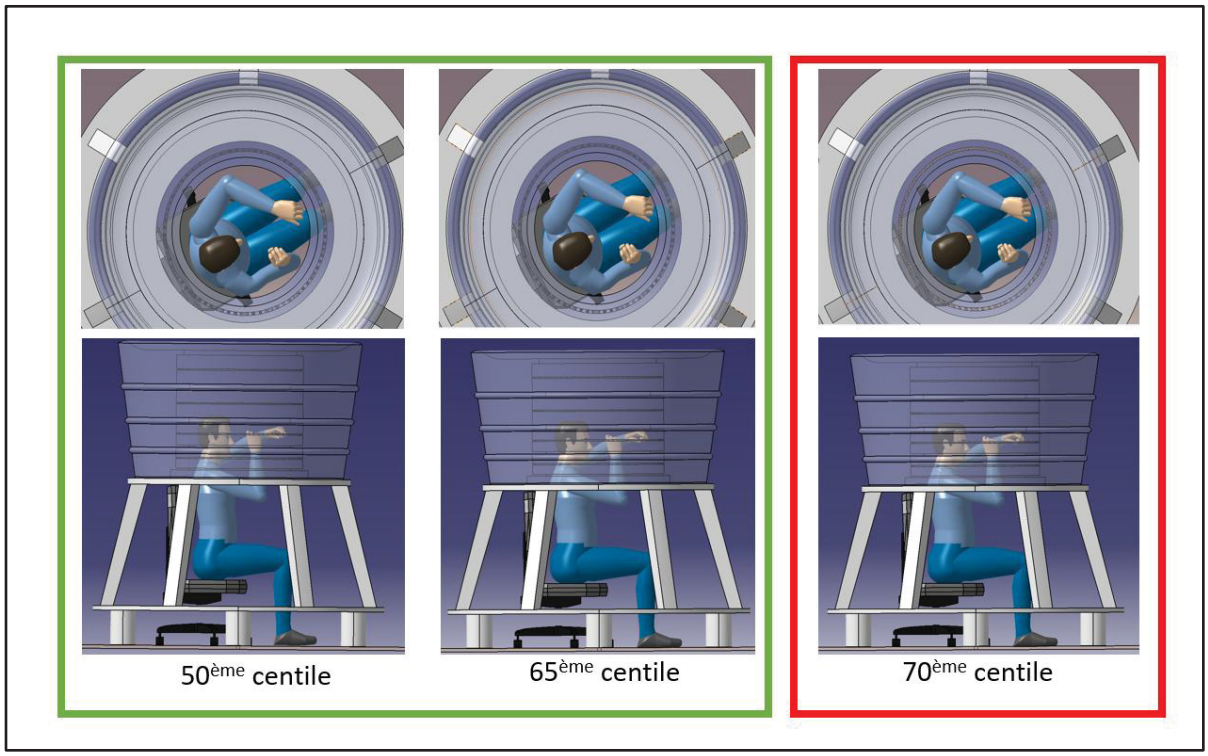


Figure 4.8 Modélisation sur Catia V5 du boulonnage (serrage initial)
avec différents centiles de travailleurs

4.1.2 Hypothèses relatives au problème

Compte tenu de l'analyse détaillée du problème et des données qui en découlent, nous avons émis les hypothèses suivantes :

- Une modification du poste de travail avec pour but de fournir plus d'espace de travail permettrait de réduire les risques de blessures par choc avec les parois de la turbine;

- Concevoir un outil mécanique destiné à rendre la posture de travail du serrage initial similaire à la posture de travail du serrage final permettrait d'améliorer l'ergonomie physique des travailleurs;

4.1.3 Choix des variables spécifiques pour l'étude

Afin d'aborder le problème relatif à l'ergonomie physique du poste de travail, nous avons choisi comme variable d'étude la posture de travail. La posture de travail sera définie à travers les angles des différents membres supérieurs à savoir le cou, les épaules, l'avant-bras et le poignet.

4.1.4 Choix des méthodes d'étude

La recherche de solution se fera en laboratoire par des simulations répétées de l'exécution du boulonnage et les évaluations ergonomiques par la méthode RULA de chaque posture simulée. La posture réaliste conférant aux membres supérieurs des angles de confort et un score RULA correcte sera la posture retenue et suggérée aux travailleurs comme posture de travail.

4.1.5 Élaboration des solutions

Au vu des principaux points dégagés dans les analyses précédentes, les objectifs principalement visés ici sont l'amélioration de la posture des travailleurs, l'optimisation de l'espace de travail et l'élargissement du bassin de la population admissible.

4.1.5.1 Amélioration de la posture

Le nouveau poste doit permettre aux techniciens d'exécuter le boulonnage initial et final en gardant une posture beaucoup plus ergonomique. Conformément aux normes ergonomiques (norme NF EN 1005-4), le but ici est de faire travailler le technicien en maintenant ses

membres entre les limites des angles de confort (*Voir* Figure 4.9 et Figure 4.10-a) et zones de conforts (*Voir* Figure 4.10-b).

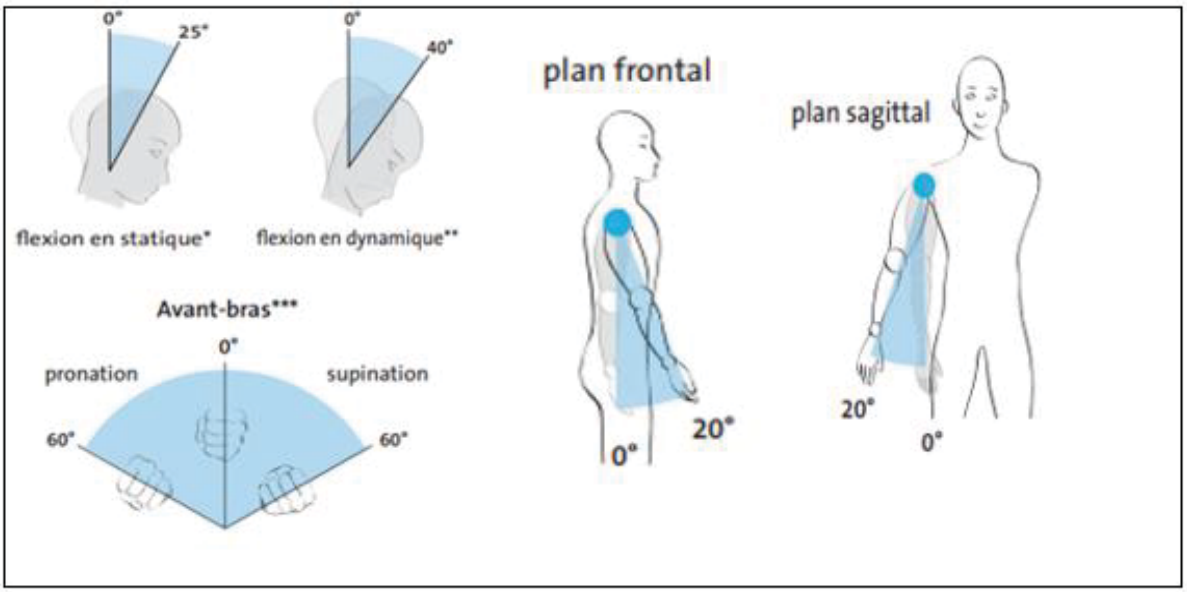


Figure 4.9 Angles de confort
Tirée d'INRS (2011)

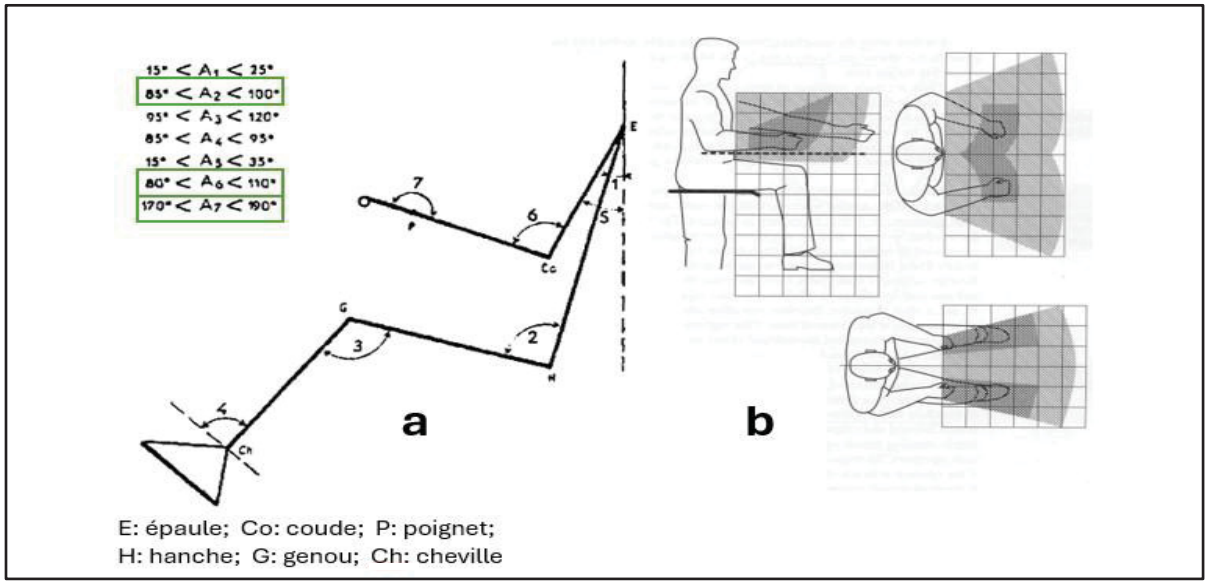


Figure 4.10 Angles de confort (a) et zone de confort (b) pour une poste de travail assis
Tirée et adaptée de Rebiffé et Coll (1966)

Tableau 4.1 Regroupement des données sur les angles de confort des membres supérieurs
Tiré de INRS (2011)

Membre	Caractéristiques	Niveau	Flexibilité des niveaux
Cou	Flexion en statique	Entre 0° et 25°	F1
	Flexion en dynamique	Entre 0° et 40°	F1
Épaule	Plan frontal	Entre 0° et 20°	F1
	Plan sagittal	Entre 0° et 20°	F1
Avant-bras	Pronation	Entre 0° et 60°	F1
	Supination	Entre 0° et 60°	F1
	Angle formé avec le bras	Entre 80° et 110°	F1
Poignet	Angle formé avec l'avant-bras	Entre 170° et 190°	F1

Dans le tableau ci-dessus, la flexibilité des niveaux pour chaque caractéristique est représentée par l'une ou l'autre des classes de flexibilité suivante :

- Classe F0 : flexibilité nulle, niveau impératif, non négociable;
- Classe F1 : flexibilité faible, niveau peu négociable;
- Classe F2 : flexibilité moyenne, niveau négociable;
- Classe F3 : flexibilité forte, niveau très négociable.

4.1.5.2 Optimisation de l'espace de travail

Le second objectif est l'optimisation de l'espace de travail afin de réduire les risques de collisions. Étant donné que les dimensions de la turbine ne peuvent pas être changées, le but est de proposer une modification du poste de travail qui permet de réduire l'inconfort des techniciens lié à l'exigüité du poste de travail et favorisant la conservation des membres supérieurs en dehors de l'espace interne de la turbine.

Par ailleurs, afin de résoudre le problème de restrictions que le poste de travail actuel engendre dans le processus de sélection des travailleurs, nous avons pensé à une modification du poste de travail qui, après des essais effectués par simulation dans Catia V5 avec différents centiles hommes et femme, permet d'élargir la population de techniciens pouvant effectuer le boulonnage dans la turbine.

Le poste de travail proposé n'est pas très différent du précédent à la différence qu'il alterne entre un poste de travail assis et un poste de travail debout dépendamment de l'étage du boulon et de la stature du technicien. Lorsque le technicien est en position debout, la chaise est enlevée pour laisser place à une plateforme élévatrice permettant de positionner l'étage d'assemblage à une hauteur convenant au technicien. Le problème du manque d'espace n'est plus aussi critique ici, car le technicien n'entre pas totalement dans la turbine, mais uniquement une partie de ses membres supérieurs. Cela implique une plus grande liberté des mouvements des bras et une diminution accrue des risques de collision.

Nous avons décidé de débuter nos simulations et propositions d'améliorations avec la phase de serrage final. Elle est celle qui présente le moins de risques de TMS. En effet, une évaluation ergonomique de la posture des travailleurs lors du boulonnage du premier étage a donné un score RULA acceptable. En outre cette phase n'implique en aucun cas un travail des bras au-dessus du niveau du cœur.

❖ Simulation du serrage final du premier étage avec la population féminine

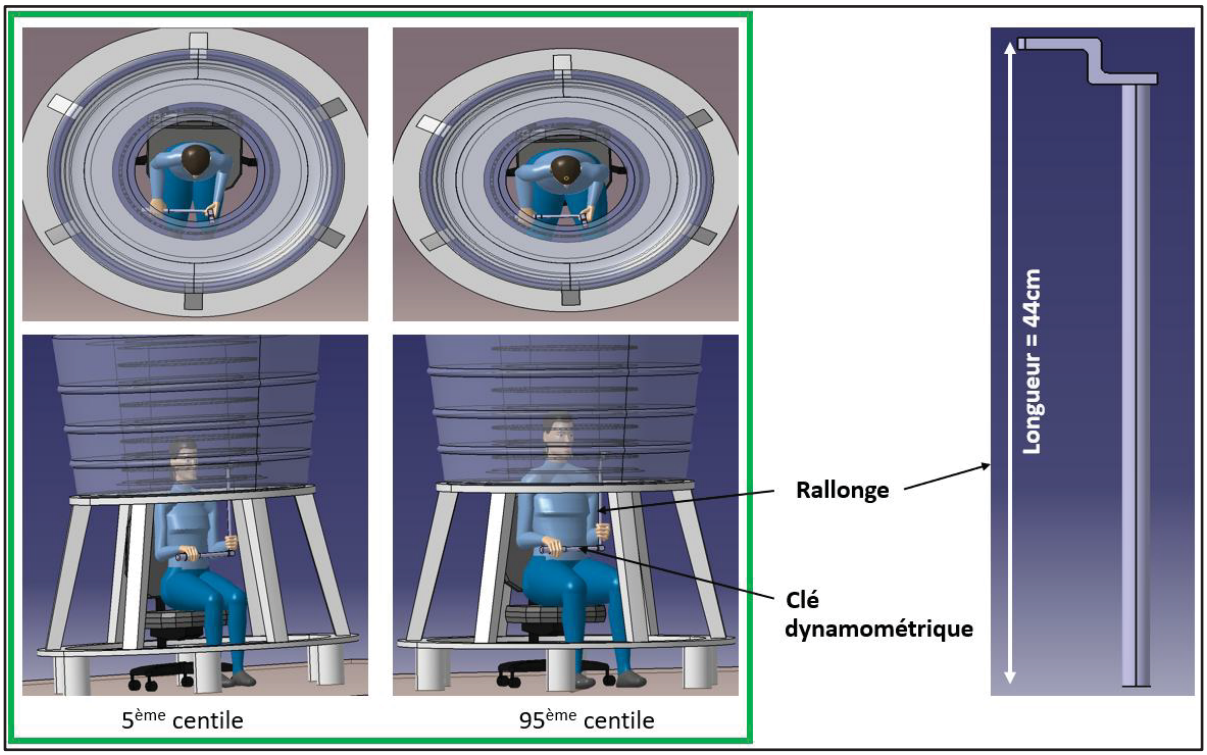


Figure 4.11 Simulation du serrage final du 1er étage par le 5e et 95e centile femme

Jusqu'au 95e centile femme, le serrage final du premier étage peut être réalisé avec l'ancienne configuration du poste de travail (*Voir* Figure 4.11). Une même rallonge mesurant 48 cm de long est utilisée par les deux mannequins. Le siège présent chez le partenaire industriel ne convient pas au 5e centile femme, nous avons de ce fait modélisé un nouveau siège et l'avons réglé à une hauteur de 38,2 cm par rapport au sol. Pour le 95e centile femme, la hauteur du siège pour cette étape correspond à la hauteur minimale du siège mesurée chez le partenaire industriel (42,5 cm).

❖ Simulation du serrage final du deuxième étage avec la population féminine

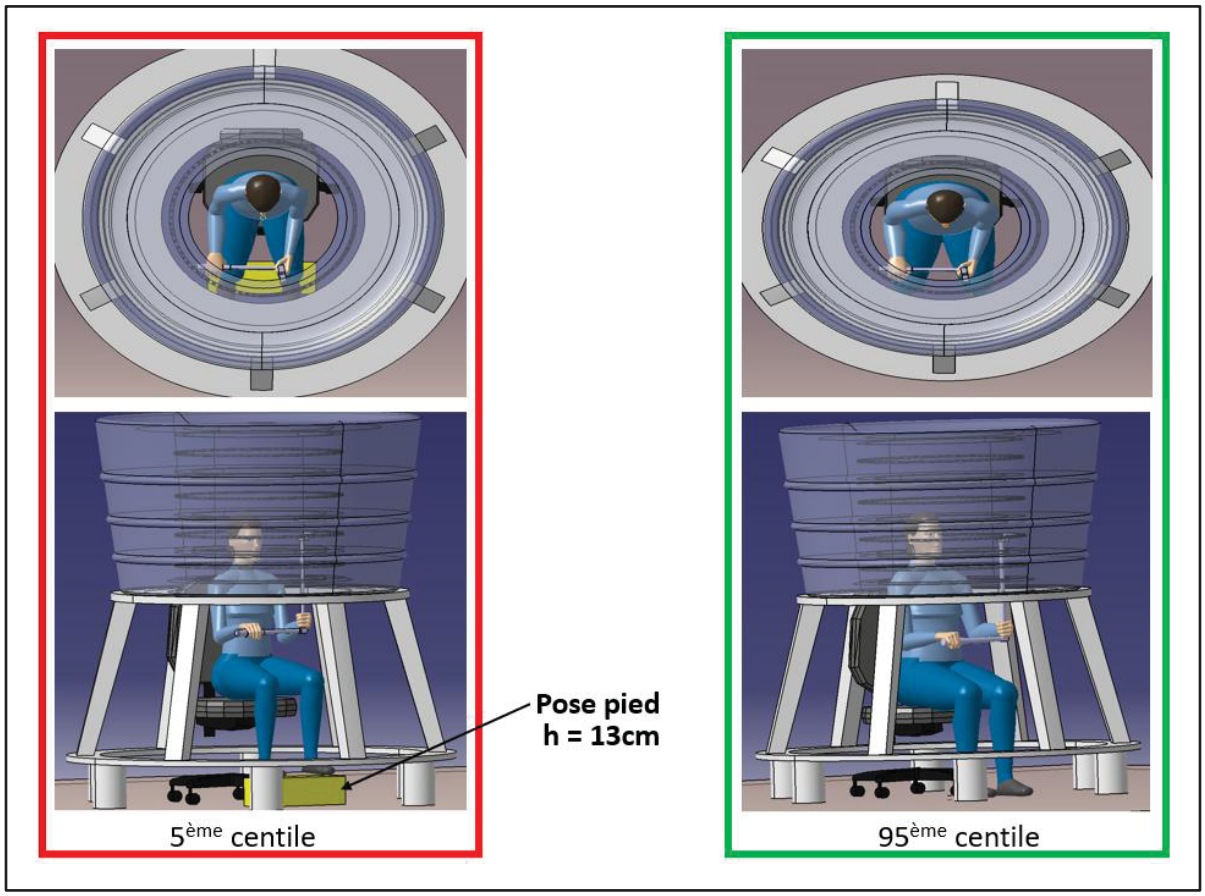


Figure 4.12 Simulation du serrage final du 2e étage par le 5e et 95e centile femme

Pour le deuxième étage de boulons, le mannequin du 95e centile femme parvient également à exécuter la tâche de serrage avec la même configuration du poste de travail. En nous assurant de demeurer dans l'intervalle des angles de confort, nous avons ajusté les angles de flexion des épaules et des coudes pour permettre au mannequin d'atteindre la hauteur de travail avec une rallonge mesurant 53 cm. La hauteur du siège n'a pas changé, elle est la même qu'à l'étape du serrage final du premier étage (42,5 cm).

Pour ce qui est du mannequin au 5e centile femme, pour pouvoir atteindre le deuxième étage de boulons avec la même rallonge, nous avons dû apporter quelques modifications à son poste

de travail. Nous avons levé son siège à une hauteur supplémentaire de 9cm par rapport à sa hauteur initiale (hauteur du siège lors du serrage final du premier étage). La conséquence de cette augmentation de la hauteur est que les pieds du mannequin ne prennent plus appui au sol et il a fallu ajouter dans le poste de travail un pose pied d'une hauteur de 13 cm environ. Ce pose pied peut être à l'origine d'accidents de travail causés par un trébuchement. Pour éviter cet ajout de risque d'accident, nous proposons de passer à la nouvelle configuration du poste de travail pour le 5e centile.

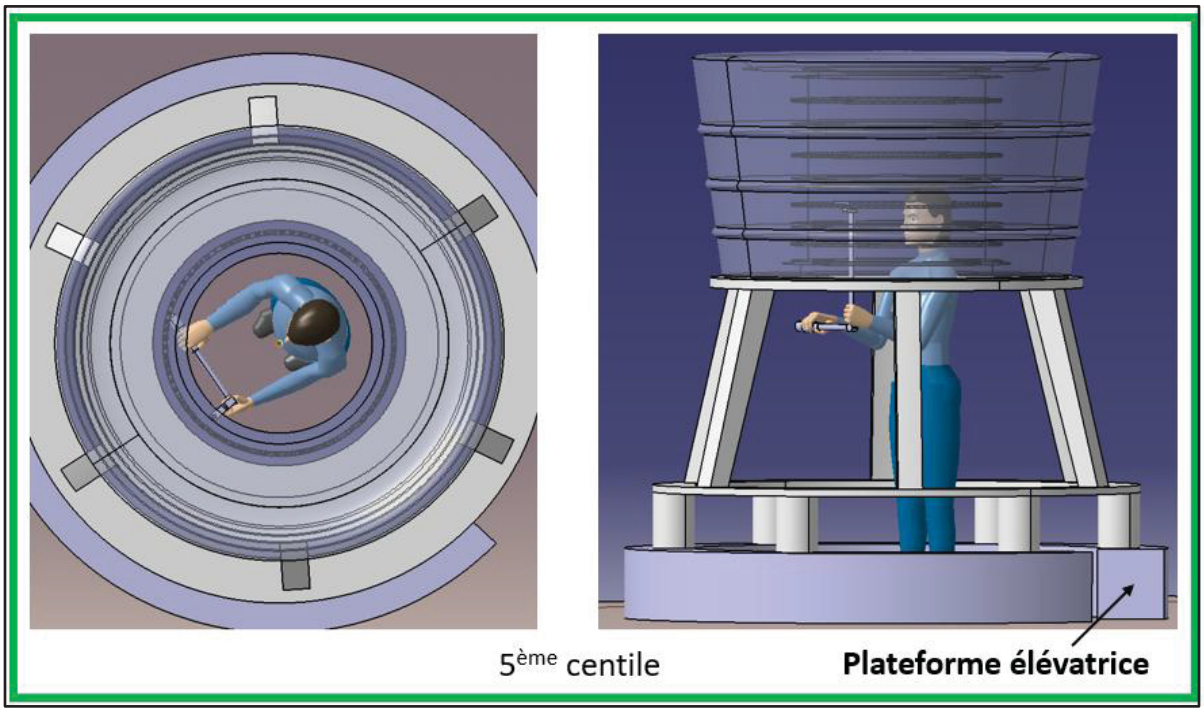


Figure 4.13 Simulation du serrage final du 2e étage par le 5e centile femme dans la nouvelle configuration du poste de travail

En passant dans la nouvelle configuration (*Voir* Figure 4.13), le serrage est effectué en position debout les pieds en appui sur le sol. La plateforme élévatrice sur laquelle est positionné le support du module est actionnée afin de lever l'ensemble d'une hauteur supplémentaire de 25 cm par rapport au sol. Les bras et les mains du mannequin sont totalement à l'extérieur du module, ce qui lui confère une grande liberté de mouvement et une grande réduction des risques

de se heurter aux parois de la turbine. La tâche est située à la hauteur des yeux et la clé d'assemblage est à la hauteur des coudes.

❖ Simulation du serrage final du deuxième étage avec la population féminine

Pour le serrage final du troisième étage de boulon, l'exécution de la tâche se fait dans la nouvelle configuration du poste de travail pour tous les centiles de la population féminine canadienne.

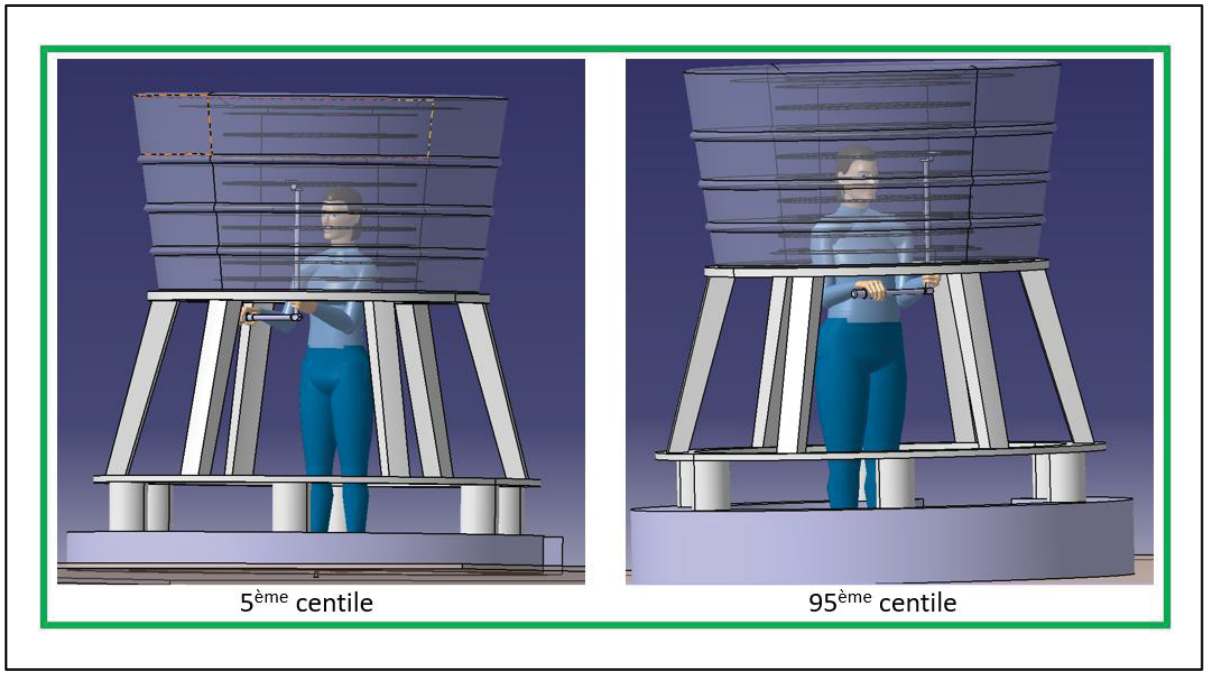


Figure 4.14 Simulation du serrage final troisième étage par le 5e et le 95e centile dans la nouvelle configuration du poste de travail

Pour le 5e centile femme, la configuration est telle que la plateforme élévatrice lève l'ensemble d'une hauteur de 15 cm par rapport au sol et cette fois-ci, le mannequin utilise une nouvelle rallonge ayant une longueur supplémentaire de 12 cm par rapport à la précédente rallonge. Ce qui signifie que la rallonge mesure 60 cm de long.

Pour ce qui est du 95e centile femme, le mannequin utilise également une rallonge de 60 cm et la plateforme élévatrice s'élève à une hauteur de 30 cm par rapport au sol.

Nous avons procédé aux mêmes simulations avec la population masculine (*Voir* ANNEXE IV, p. 157) et les résultats obtenus nous ont permis de dresser le Tableau 4.2 qui est une synthèse des recommandations par rapport aux configurations du poste de travail dépendamment du centile auquel appartient (ou approche) le travailleur et de son sexe.

Tableau 4.2 Tableau de synthèse des recommandations

		Siège		**Plateforme**		**Rallonge**		**Outil mécanique**	
		Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme	Femme	Homme
1er étage	5ème centile	38,2 cm	25,2			48 cm	48 cm	48 cm	48 cm
	95ème centile	42,5 cm	49 cm		25,2 cm		61 cm		61 cm
2ème étage	5ème centile			25 cm	30 cm	48 cm	59 cm	48 cm	59 cm
	95ème centile	42,5 cm	49 cm		25,2 cm	53 cm	76 cm	53 cm	76 cm
3ème étage	5ème centile			15 cm	20 cm	60 cm	61 cm	60 cm	61 cm
	95ème centile			30 cm	45 cm		76 cm		76 cm

Les modélisations effectuées dans cette section sont uniquement pour le serrage final. Chez le partenaire industriel, les techniciens utilisent la rallonge uniquement lors du serrage final avec la clé dynamométrique et non lors du serrage initial avec la clé pneumatique, de ce fait les postures de travail diffèrent grandement pour les deux types de serrage. L'utilisation de la rallonge lors du serrage final a pour avantage d'éliminer le travail des bras au-dessus du niveau du cœur.

Le fait que cette rallonge ne soit pas utilisée lors du serrage initial s'explique par le fait qu'elle ne permet pas la transmission du couple produit par la clé pneumatique au boulon à serrer. L'utilisation d'un outil conçu pour jouer le rôle de la rallonge tout en permettant la transmission aisée du couple de la clé à laquelle elle est couplée permettrait de résoudre ce problème. Ainsi, l'utilisation de cet outil lors du serrage initial fera en sorte que la posture de travail soit semblable à la posture de travail adoptée lors du serrage final. Le Tableau 4.2 ci-dessus contient déjà les informations (colonne outil mécanique) par rapport aux différentes longueurs de l'outil à concevoir dépendamment du centile auquel appartient (ou approche) le travailleur et de son sexe.

4.1.5.3 Conception de l'outil mécanique

La méthodologie suivie ici pour la conception de l'outil est celle proposée par Boisseau (2016) et est intégrée à notre démarche.

❖ Analyse du besoin et justification du cahier de charge

Lors du serrage initial, la posture adoptée par les techniciens (*Voir* Figure 4.3) est très peu ergonomique et sujette à de nombreux risques vis-à-vis des techniciens. Il est question de proposer un outil pouvant ramener la posture adoptée au serrage initial à une posture semblable à celle adoptée lors du serrage final. Le but est de permettre aux techniciens d'exécuter le boulonnage initial dans les mêmes conditions que le boulonnage final dans le poste de travail amélioré proposé dans la section Optimisation de l'espace de travail.

En répondant successivement aux questions « à qui le produit est-il destiné ? Sur quoi agit le produit ? Et dans quel but ? », nous parvenons à réaliser le diagramme bête à cornes du produit à concevoir (*Voir* Figure 4.15).

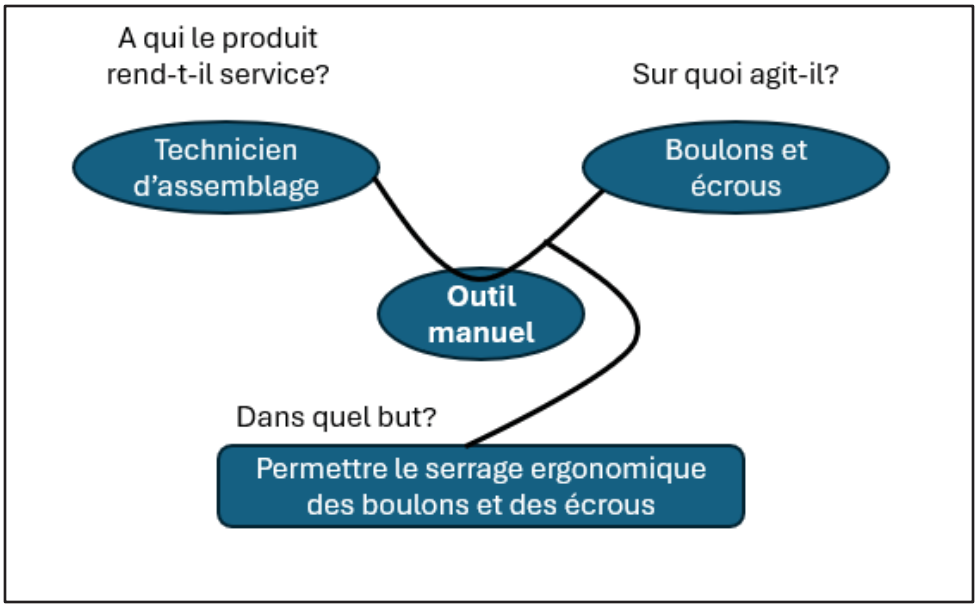


Figure 4.15 Diagramme bête à cornes

Ainsi, l'objectif de l'outil manuel à concevoir ici est de permettre le serrage final des boulons aux différents étages du module 8 de la turbine à gaz tout en ramenant le technicien d'assemblage dans une posture plus ergonomiquement acceptable.

Afin de représenter la relation entre l'outil mécanique à concevoir et son environnement, il est important de réaliser son diagramme pieuvre. Il permet de voir les fonctions essentielles et secondaires de l'outil et la façon dont ces fonctions réagissent avec le milieu extérieur.

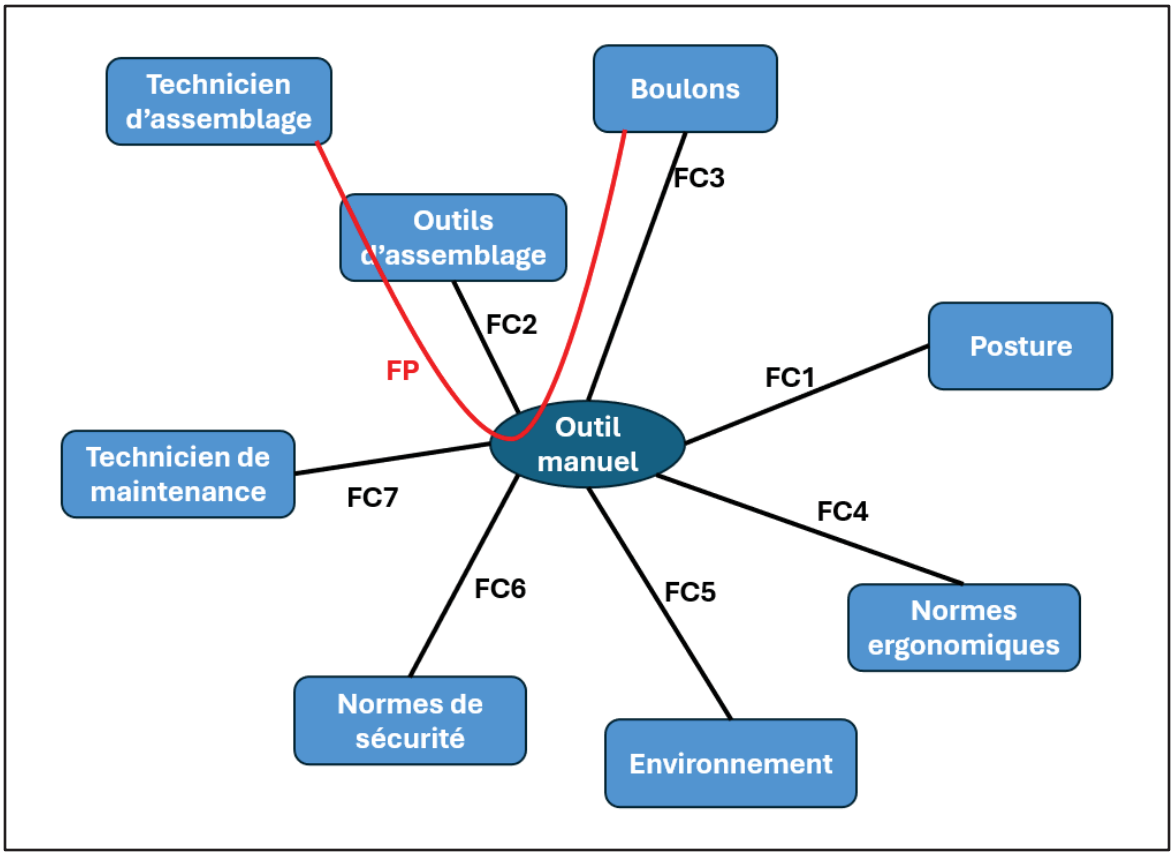


Figure 4.16 Diagramme pieuvre de l'outil manuel à concevoir

En respectant la normalisation faite par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), nous formulons et définissons les différentes fonctions de l'outil dans les tableaux ci-dessous :

❖ FP (Fonction principale) : serrer les boulons

Tableau 4.3 Fonction principale

Caractéristiques	Niveau	Flexibilité
Couple de serrage	56,94 N	F0

- FC1 (Fonction contrainte 1) : Ramener le technicien dans une posture plus ergonomique lors du serrage des boulons

Se référer au Tableau 4.2 en ce qui la longueur adéquate de l'outil dépendamment du centile du travailleur.

- FC2 : S'adapter aux outils d'assemblage déjà en utilisation

Ici, l'outil doit pouvoir être couplé aux équipements actuellement utilisés pour l'assemblage des boulons. Il doit également permettre l'utilisation éventuelle d'une boulonneuse qui actuellement ne peut être utilisée à cause de l'exigüité de l'espace d'assemblage.

Tableau 4.4 Fonction contrainte 2

Caractéristiques	**Niveau**	**Flexibilité**
Caractéristiques de l'interface de la clé pneumatique	Dimensions et forme de la tête d'accouplement	F0
Caractéristiques de l'interface de la clé dynamométrique	Carré conducteur de mêmes dimensions : ½'' (1,25cm de côté)	F0
Boulonneuse		

❖ FC3 : S'adapter aux différents boulons de la turbine

Tableau 4.5 Fonction contrainte 3

Caractéristiques	**Niveau**	**Flexibilité**
Type de boulons (par exemple M12)	Dimensions des boulons	F0

❖ FC4 : Se conformer aux normes ergonomiques

Les efforts admissibles dépendent non seulement des paramètres propres à l'individu (son sexe, son âge, sa condition physique, etc.), mais également de la posture dans laquelle l'individu se trouve, de la fréquence des mouvements et aussi du sens dans lequel sont dirigés ses efforts. La Figure 4.11 à la Figure 4.14 représentent les postures que nous souhaitons faire adopter aux techniciens lors de l'exécution du boulonnage dans la nouvelle configuration du poste de travail. Comme expliqué dans la section Optimisation de l'espace de travail, le travailleur alternera entre la position assise et la position debout dépendamment de l'étage de boulonnage en cours et de sa stature. Selon la conception que nous ferons de l'outil, il devra baisser d'une main pour serrer un boulon. Le tableau ci-après nous renseigne sur l'effort maximal (en Newton) pouvant être exercé au 15e et au 50e centile homme dépendamment de la posture dans laquelle il se trouve. Dans le cadre de cette étude, afin d'accommoder le maximum de personnes, nous considèrerons le 15e centile.

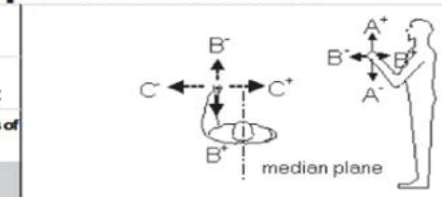
Assembly Specific Force Atlas

F_{max} — all forces in Newton [N]

whole body forces, two handed male
correction factor for female: 0,5 for ± A; 0,65 for ±B and ±C

all values of resulting force vectors are rounded to multiples of 5 N

P15 : 15. male force percentile (for planning analysis)
P 50: 50. male force percentile (for existing analysis)



upright		P15		P50		bent		P15		P50		above head		P15		P50	
	+A	380	↗	515	↗		+A	320	↗	485	↗		+A	360	↗	455	↗
	-A	405	↙	530	↙		-A	305	↙	405	↙		-A	410	↙	520	↙
	+B	260	↘	340	↘		+B	315	↘	420	→		+B	245	→	330	→
	-B	380	↖	505	↖		-B	440	↖	645	↖		-B	395	↖	525	↖
	+C	205	↖	315	↖		+C	225	↖	335	↖		+C	160	↖	235	↖
	-C	170	↘	280	↘		-C	140	↘	230	↘		-C	150	↘	235	↘
standing - upright	h = 1500 mm					bent	h = 1100 mm					above head	h = 1700 mm				
	+A	320	↗	450	↗		+A	275	↗	410	↑		+A	345	↗	460	↗
	-A	345	↙	455	↙		-A	290	↙	360	↙		-A	410	↙	520	↙
	+B	335	↘	485	→		+B	335	→	555	→		+B	320	↘	430	↘
	-B	370	↖	530	↖		-B	340	↖	475	←		-B	340	↖	445	↖
	+C	225	↖	335	↖		+C	220	↖	310	↖		+C	200	↖	300	↖
	-C	180	↘	265	↘		-C	160	↘	230	↘		-C	200	↘	295	↘
kneeling - upright	h = 800 mm					bent	h = 600 mm					above head	h = 1100 mm				
	+A	315	↗	435	↗		+A	295	↗	425	↗		+A	330	↗	410	↗
	-A	375	↙	465	↙		-A	300	↙	400	↙		-A	395	↙	475	↙
	+B	330	↘	435	↘		+B	380	→	485	→		+B	305	↘	390	↘
	-B	315	↖	410	↖		-B	325	↖	450	↖		-B	325	↖	390	↖
	+C	190	↖	270	↖		+C	205	↖	300	↖		+C	155	↖	215	↖
	-C	175	↘	260	↘		-C	155	↘	230	↘		-C	150	↘	220	↘
sitting - uprigt	h = 1000 mm					bent	h = 800 mm					above head	h = 1200 mm				

Figure 4.17 Tableau des efforts admissibles
Tirée et adaptée de Schaub et al. (2015)

Il faut également tenir compte des exigences ergonomiques vis-à-vis du poids de l'outil, des dimensions et de la forme de la poignée de l'outil. Selon la brochure d'information de l'INRS parue en (2011), la préhension en prise digitale (pince) est plus sollicitante que celle à pleine main : notre outil devra dès lors avoir une poignée permettant une prise à pleine main et une forme favorisant un contact maximum avec surface de la paume de main et des doigts afin de permettre la répartition de la pression (Strasser & Bullinger, 2007). La poignée de l'outil doit également être conçue de sorte à permettre au technicien qui se sert de l'outil de garder sa main dans le prolongement de son avant-bras. Dans cette configuration, la force de préhension est la plus élevée et les risques de lésions sont les plus faibles dus aux faibles contraintes mécaniques (INRS, 2011).

Dans le Tableau 4.6 ci-dessous, nous avons reporté quelques recommandations de Cacha (1999) et ceux de Strasser et Bullinger (2007) sur les dimensions de la poignée de l'outil et la masse maximale acceptable de l'outil.

Tableau 4.6 Fonction contrainte 4

Caractéristiques	**Niveau**	**Flexibilité**
Diamètre de la poignée	Entre 3.2 et 4.4 cm	F1
Longueur de la poignée	Min 10.2 cm	F1
Longueur de la poignée (utilisation avec des gants de travail)	Min 11.4 cm	F1
Masse de l'outil	2.3 kg	F1
Effort admissible pour tirer d'une main	17 daN	F1
Effort admissible pour baisser d'une main	6 daN	F1

❖ FC5 : s'adapter à l'environnement dans lequel il est utilisé

Les tâches de boulonnage sont exécutées dans un espace exigu, de ce fait les dimensions de l'outil doivent être de sorte à permettre son utilisation sans un ajout de contraintes posturales aux techniciens. Les dimensions critiques de l'encombrement de l'outil sont respectivement le diamètre de l'outil et sa longueur représentés sur la figure ci-dessous par l. Les différentes longueurs de l'outil sont déjà déterminées dans le Tableau 4.2 du fait de la fonction contrainte 1 (FC1).

Tableau 4.7 Fonction contrainte 5

Caractéristiques	Niveau	Flexibilité
Lieu d'utilisation	Atelier d'assemblage de la turbine à gaz	F0
Encombrement de l'outil	Diamètre	F1
	Longueur	F0

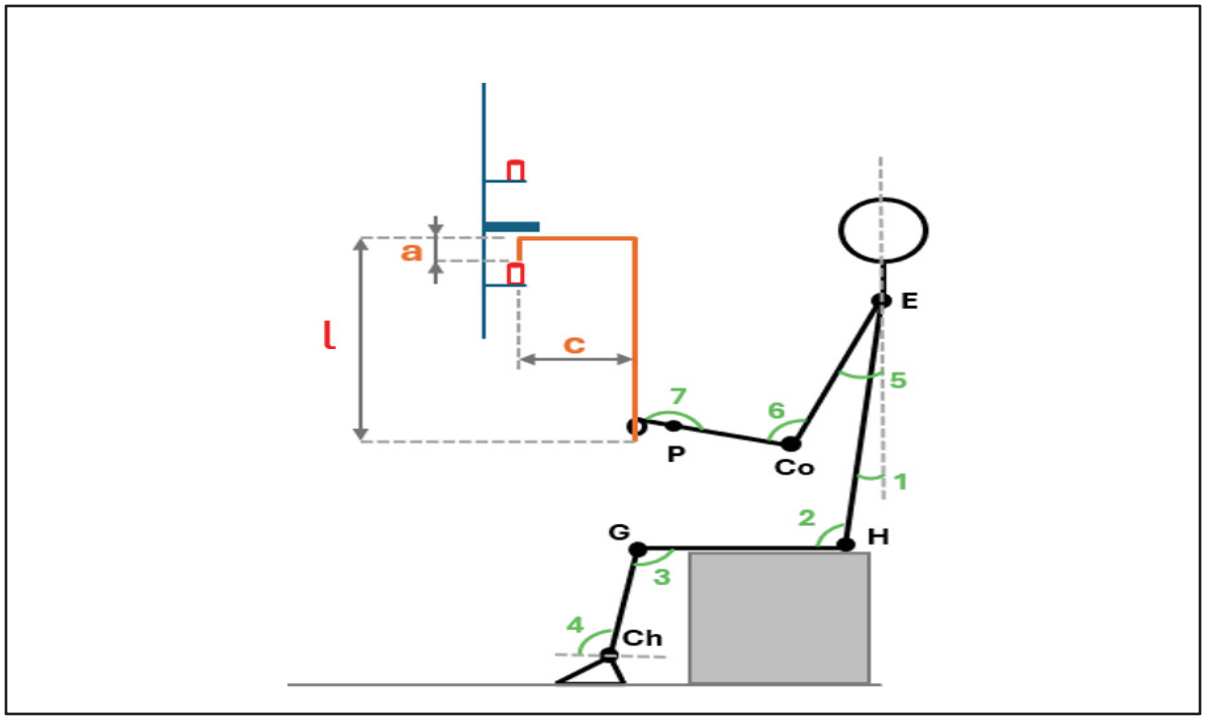


Figure 4.18 Représentation simplifiée de la configuration de la tâche de boulonnage pour le calcul de l'encombrement de l'outil

❖ FC6 : se conformer aux normes de sécurité

Il faut prévoir un coefficient de sécurité à inclure dans les calculs de dimensionnement de l'outil.

Tableau 4.8 Fonction contrainte 6

Caractéristiques	**Niveau**	**Flexibilité**
Coefficient de sécurité	S=3 (Boisseau, 2016)	F1
Matériaux ou couche externe de la poignée de l'outil	Non-conducteur, non poreux, lisse légèrement compressible	F0

❖ FC7 : être entretenu par le technicien de maintenance

Tableau 4.9 Fonction contrainte 7

Caractéristiques	**Niveau**	**Flexibilité**
Périodicité	1 fois par an	F0
Durée	2h	F1

❖ Étude de la faisabilité

L'étude de faisabilité débute par la recherche des solutions potentielles à travers l'utilisation de l'outil qualité FAST (Fonction Analysis System Technique) (Boisseau, 2016).

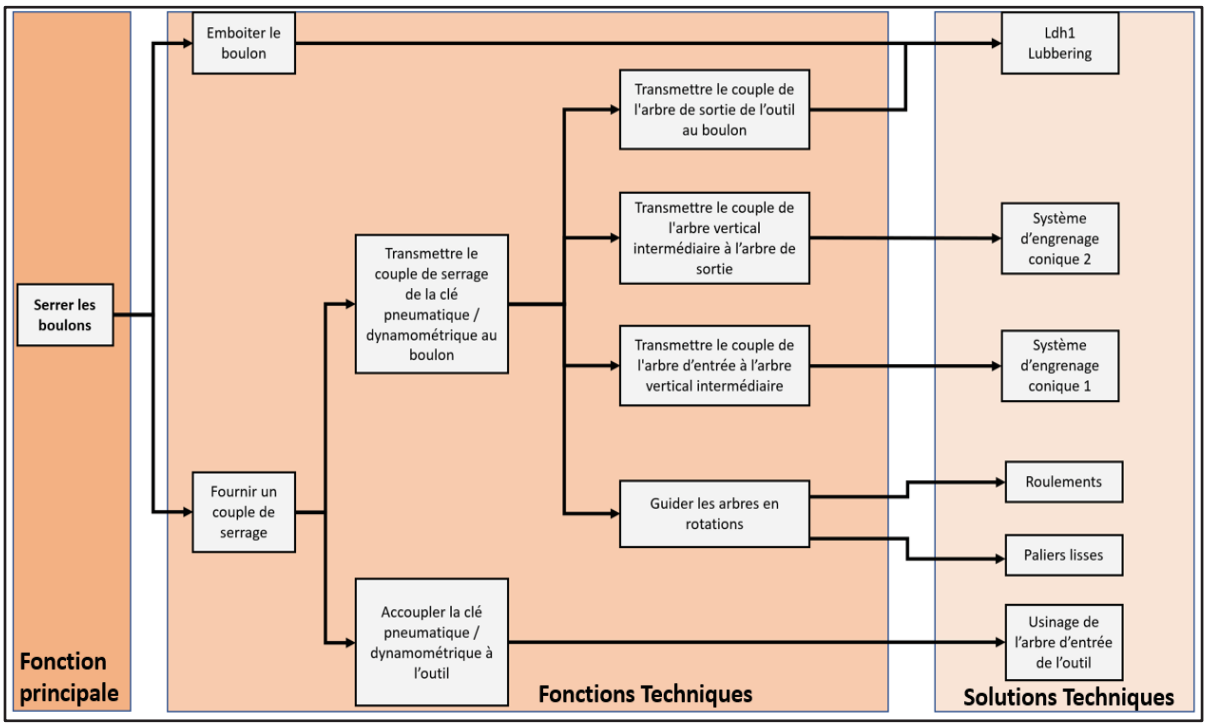


Figure 4.19 Diagramme Fast de l'outil mécanique

À la suite de l'établissement du diagramme Fast, nous avons pu avoir une idée plus éclairée sur le principe de fonctionnement de l'outil et de toutes les pièces internes qui le constituent (*Voir* Figure 4.20).

La clé pneumatique est couplée à l'outil présenté ci-dessous en (1) grâce à l'usinage réalisé sur l'arbre d'entrée (2) de l'outil. Une fois couplé, l'arbre d'entrée transmet le couple de la clé pneumatique, à l'arbre intermédiaire (5) via l'engrenage conique (3) et les paliers (4) qui assurent le guidage en rotation. L'arbre intermédiaire (5) transmet ensuite le couple à l'arbre de sortie (6) de l'outil suivant le même principe de l'engrenage et des paliers. La tête d'outil Ldh1 Lubbering utilisée par le partenaire est raccordée à notre outil par le filetage (8) et le moyeu d'accouplement (7). Par ce moyeu, la tête Ldh1 Lubbering reçoit le couple de l'arbre de sortie et l'applique sur le boulon.

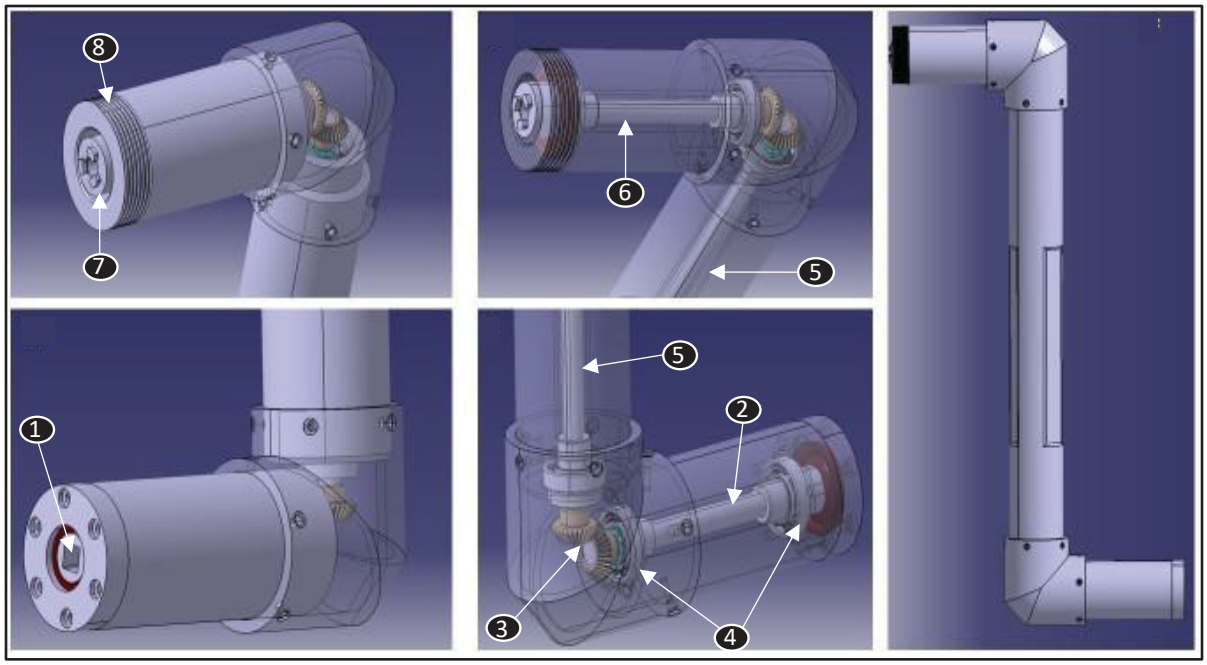


Figure 4.20 Vue de l'outil mécanique et de ses pièces constitutives

Compte tenu du fait que nous souhaitons rendre la posture de travail du boulonnage final identique à la posture de travail du boulonnage initial, il convient de dire que les dimensions de la rallonge déterminées durant les simulations lors de la phase de la proposition d'amélioration du poste de travail seront les mêmes qu'il faudra attribuer à l'outil mécanique. Ainsi pour un même étage, la rallonge et l'outil mécanique auront la même longueur.

En résumé, pour accommoder l'ensemble de la population canadienne, la boite d'outils pour l'assemblage du module 8 de la turbine à gaz dans la nouvelle configuration du poste de travail devra contenir six rallonges et six outils mécaniques. Les différentes longueurs de ces outils sont représentées sur la Figure 4.21 ci-dessous.

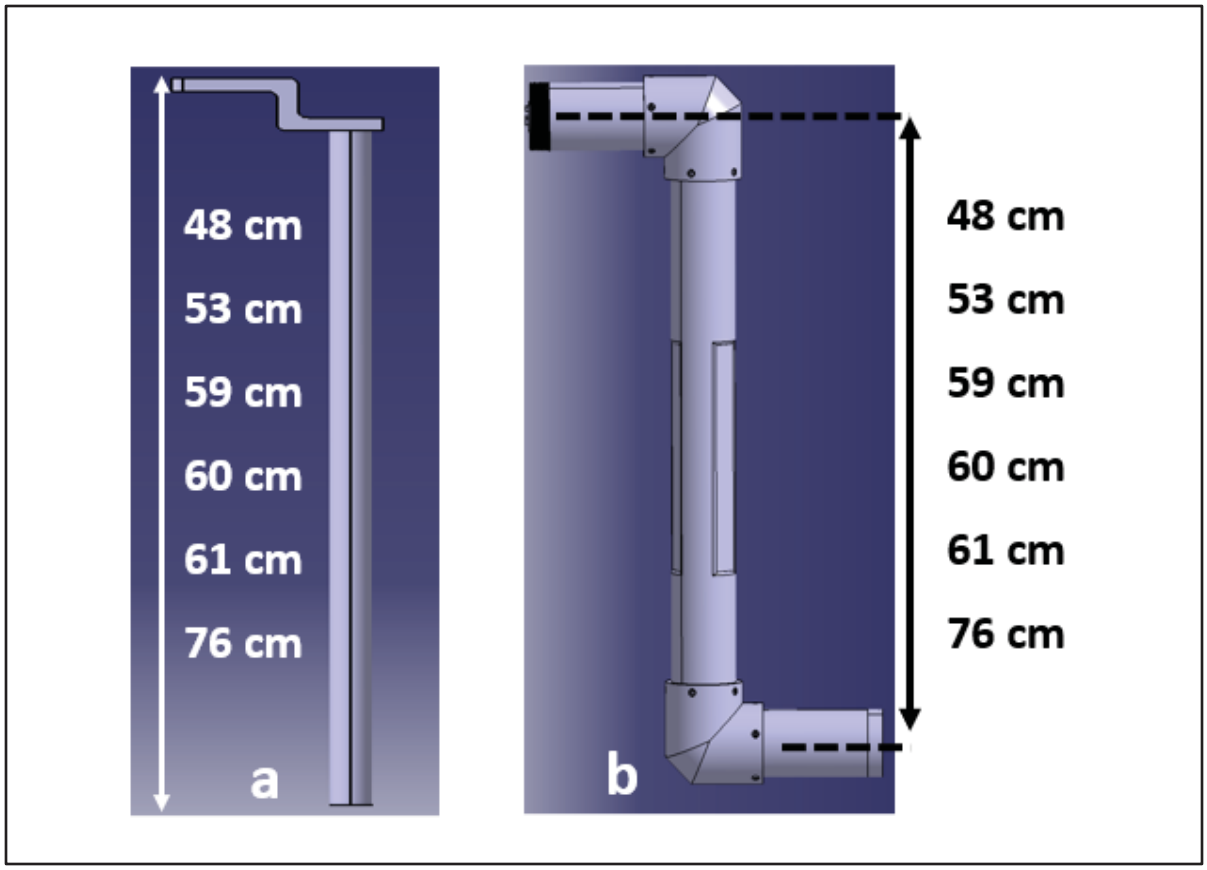


Figure 4.21 Dimensions des six rallonges en (a) et des six outils mécaniques en (b)

4.1.6 Étude de l'impact de la solution

Il est question ici de procéder à l'évaluation de la solution proposée et de procéder à sa validation. Dans le cadre de cette étude, l'évaluation de la solution porte uniquement sur l'évaluation ergonomique de la nouvelle configuration du poste de travail à travers l'évaluation par la méthode RULA des postures des travailleurs.

Le boulonnage se fait comme illustré sur les images des sections précédentes avec l'utilisation d'une clé pneumatique d'une masse de 1,8 kg environ et d'une rallonge de masse inférieure. Le poids de la rallonge est partiellement supporté par le boulon sur lequel la rallonge est montée lors du serrage, ce qui réduit ainsi la charge totale devant être supportée par les bras.

N.B. Dans la suite du texte, durant l'évaluation ergonomique, nous avons uniquement considéré le cas où la main droite est la main dominante du travailleur.

Le bras droit est le bras supportant la plus grande charge. Pour l'évaluation ergonomique des postures, nous avons émis l'hypothèse que le bras droit exécute des mouvements répétés avec une fréquence supérieure à 4 fois par minute.

Pour le bras gauche, nous avons effectué l'évaluation en considérant deux cas de figure : dans le premier cas, nous avons émis l'hypothèse que le bras gauche est statique, son unique rôle est de maintenir la rallonge en place tout en permettant un mouvement pivot entre la rallonge et la main (fermée). Dans le deuxième cas de figure, nous avons considéré que les mouvements du bras gauche sont intermittents. Avec une fréquence inférieure à 4 fois par minute, le bras gauche va permettre le positionnement de la tête de la rallonge sur un boulon et ensuite maintenir la rallonge en position.

Les évaluations ont été effectuées avec Catia V5 sur les trois étages d'assemblage avec un mannequin femme du 5e centile et mannequin homme du 95e centile tous deux issus de la base de données de la population canadienne. Les postures évaluées ne sont pas les postures actuelles des techniciens, mais celle que nous proposons d'adopter pour effectuer un boulonnage plus sécuritaire dans la nouvelle configuration du poste de travail.

Les détails des évaluations ergonomiques par la méthode RULA sont donnés à l'ANNEXE V. Le Tableau 4.10 fournit les scores RULA des postures de travail aux différents étages de boulons ainsi que les scores RULA des postures de travail dans l'ancienne configuration du poste de travail. Ce tableau permet d'apprécier une nette amélioration ergonomique des postures principalement pour le troisième et le deuxième étage. Ces résultats suggèrent également qu'il serait mieux de prioriser des postures intermittentes du bras gauche par rapport aux postures statiques.

Tableau 4.10 Tableau récapitulatif des Score RULA des postures proposées vs anciennes postures

		Nouvelle posture						Score RULA ancienne posture
		5ème centile femme			95ème centile homme			
		Côté gauche		Côté droit	Côté gauche		Côté droit	
	Posture	Intermittente	Statique	Répétée	Intermittente	Statique	Répétée	
Étage de boulons	1er étage	2	3	4	2	2	4	4
	2ème étage	2	4	4	2	4	4	6 et 7
	3ème étage	2	4	4	2	4	4	7

CHAPITRE 5

RÉSULTAT (PARTIE 3) : CAS D'ÉTUDE – PHASE DE L'ERGONOMIE COGNITIVE ET ÉVALUATION GLOBALE

Ce chapitre est une continuité du précédent dont le but est de valider la méthodologie de conception que nous proposons dans ce mémoire. Ce chapitre en particulier traite des deux dernières phases de notre démarche. Il s'agit donc ici de mettre en application les différentes étapes de la phase de l'ergonomie cognitive afin de répondre à une des préoccupations de notre partenaire industriel : « Comment fournir les instructions de travail aux techniciens directement dans le poste d'assemblage ? ». Autrement dit, « quel est l'équipement d'assistance cognitive le mieux adapté pour le poste d'assemblage du partenaire industriel ? ».

Par la suite, ce chapitre a également pour but de procéder à une évaluation du nouveau système de travail et de faire ressortir tous les risques résiduels.

5.1 Sélection du type d'assistance

En nous basant sur les facteurs à prendre en compte tel que décrit par Haase et al. (2020) et aux connaissances du système de travail, nous sommes parvenus à dresser une liste de points cruciaux qui vont guider le choix préliminaire de la technologie:

- Les travaux d'assemblage / désassemblage des éléments de la turbine ne se font pas à poste fixe. En effet le travailleur assemble les éléments à l'intérieur et à l'extérieur des modules de la turbine, ce qui le pousse à changer régulièrement de poste et de posture de travail. Le système d'assistance ne peut donc être fixe, mais préférablement mobile ou portable.
- Les travaux d'assemblage / désassemblage exigent que les deux mains du travailleur soient constamment occupées et en mouvement; de plus une grande partie des étapes

d'assemblage / désassemblage est réalisée dans un espace restreint à mobilité réduite à l'intérieur du support du module de la turbine.

- Les surfaces internes de la turbine sont principalement des solides de révolution, et l'espace de travail y est très restreint.

La Figure 5.1 présente un extrait du tableau de la taxonomie des systèmes d'assistance tiré de Pokorni et Constantinescu (2021) dans lequel nous avons exclu (encadré en rouge) toutes les possibilités inapplicables ou non nécessaires à notre cas d'étude.

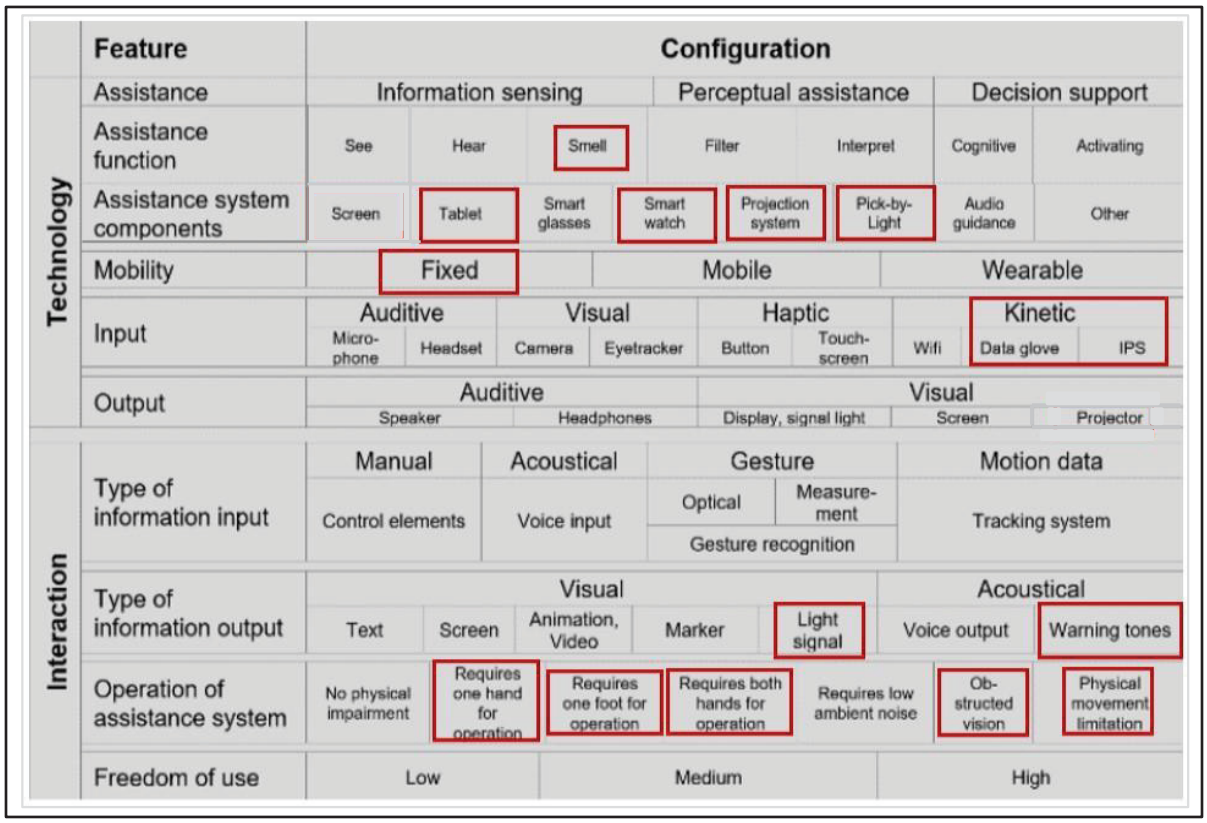


Figure 5.1 Extrait de la taxonomie des systèmes d'assistance
Tirée et adaptée de Pokorni et Constantinescu (2021)

Par la suite nous avons réalisé dans le Tableau 5.1 un tri préliminaire des équipements d'assistance. Les visiocasques ou lunettes de RE paraissent être la meilleure solution pour le poste et la tâche étudiée.

Tableau 5.1 Tri préliminaire des systèmes d'assistance

Types de technologie	Type de système ou équipement	Avantages	Inconvénients
Réalité virtuelle	Casque de RV Système CAVE Power wall	Principalement utilisée pour la formation, pas adaptée au travail sur le terrain, ne permet pas une interaction avec l'environnement réel de travail; c'est une technologie à exclure	
	Caméra	Mobile, léger, peut être positionnée de sorte à filmer et à transmettre en temps réel les zones visuellement difficiles d'atteinte ou inaccessibles	Équipement supplémentaire nécessitant d'être positionné au début de chaque tâche
Réalité augmentée	Handheld (téléphone, tablette, ordinateur portable)	Équipements mobiles et puissants à faibles couts ; implémentation aisée (Fang et al., 2023)	Requièrent l'utilisation permanente d'une ou de deux mains pour tenir et manipuler(Fang et al., 2023)
	RAS (Pick-by-ligth, systèmes de projection des instructions)	Meilleures performances ergonomiques (Fang et al., 2023)	Applicable uniquement pour des postes de travail fixes (Fang et al., 2023) Difficilement réalisable pour des assemblages internes en espaces restreints et parois cylindriques
	Visiocasque	Mobiles, liberté des deux mains, permet une flexibilité des postes de travail (Fang et al., 2023)	Port d'un équipement supplémentaire, autonomie de la batterie
	Gants intelligents	Ils permettent des interactions plus naturelles avec les éléments virtuels (Dipietro, Sabatini, & Dario, 2008) Offrent un retour haptique et permet la reconnaissance des composants (Naeini & Nadeau, 2022)	Faible robustesse et durabilité (Dipietro et al., 2008) réduction de la dextérité des mains et de la proprioception naturelle (INRS, 2011)

L’utilisation d’un visiocasque pourrait éviter au technicien déjà installé dans le poste d’assemblage des déplacements inutiles vers l’ordinateur de bureau fixe pour consulter les changements apportés au flux de travail. Par ailleurs le visiocasque étant équipé d’une caméra et d’un système audio, cela permettrait également au technicien de bénéficier d’une téléassistance en temps réel (Aranda-García et al., 2022 ; Klinker et al., 2018) et faciliter également la documentation (Klinker et al., 2018) de ses travaux et la rédaction de ses rapports. Par ailleurs la communication avec les autres personnes impliquées dans le projet sera également plus aisée, permettant par la même occasion un suivi en temps réel de l’évolution des tâches.

En outre, le visiocasque peut être connecté via Bluetooth ou réseau Wi-Fi à une caméra externe installée à un emplacement spécifique. Ainsi, dans les situations d'assemblage, et en particulier lors de boulonnages dans des zones visuellement inaccessibles, cette connexion entre la caméra et le visiocasque offre au technicien une visibilité optimale et sans effort sur la tâche en cours, facilitant ainsi l'exécution précise et efficace de son travail.

5.2 Mise en place de l’AHP

5.2.1 Définition des critères de comparaison retenus pour les visiocasques

Le choix de la lunette pour une assistance visuelle et cognitive des travailleurs dans les tâches d’assemblage se fait en prenant en considération des critères d’ordre technique et ergonomique de la lunette. Ceux retenus pour cette étude (*Voir* Figure 5.2) sont tirés des études similaires

menées par Syberfeldt, Danielsson, et Gustavsson (2017) et Fraga-Lamas, Fernandez-Carames, Blanco-Novoa, et Vilar-Montesinos, (2018).

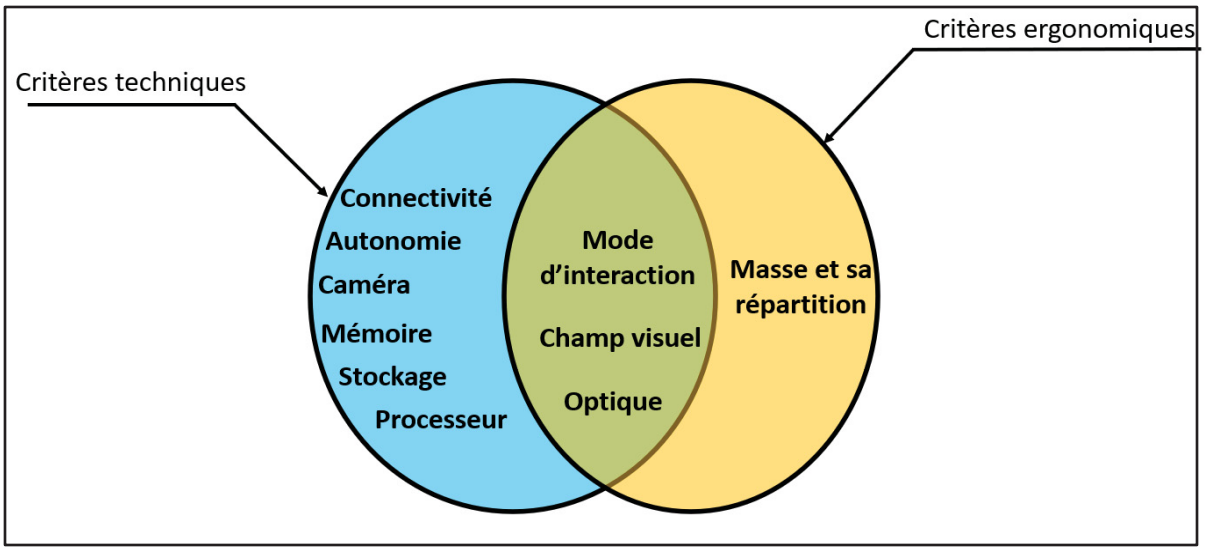


Figure 5.2 Critères de comparaison des lunettes

5.2.1.1 Champ visuel

Défini comme étant la *« partie de l'environnement perçue quand les yeux et la tête restent immobiles »* (Nadeau & Arteau, 2005), le champ de vision est une caractéristique essentielle à prendre en compte lors du choix d'une lunette intelligente. Il est déterminant de la quantité d'informations pouvant être affichées par la lunette et la zone où elles doivent être affichées (Syberfeldt et al., 2017).

Dans l'utilisation de la réalité augmentée, les lunettes et les casques ne permettent pas aux utilisateurs d'avoir un champ visuel augmenté (champ visuel avec du contenu virtuel) aussi large que celui des yeux d'un humain. À titre de comparaison, le champ facial horizontal des yeux est d'environ 124° binoculaire contre 40° horizontal pour la lunette de RA offrant le plus grand champ visuel sur le marché à ce jour. Cela implique que la présentation du contenu virtuel se fait dans une petite portion du champ visuel de l'humain, ce qui limite ainsi considérablement la quantité d'informations pouvant être affichées par la lunette et la zone où elles peuvent être affichées.

Du point de vue de la productivité, les performances du travailleur sont grandement influencées par l'étroitesse du champ visuel de la lunette (Qin, Bloomquist, Bulbul, Gabbard, & Tanous, 2021). Plus le champ visuel est étroit, plus le travailleur aura du mal à accéder aux données virtuelles et donc à exécuter ses tâches. En effet, un champ visuel étroit oblige le travailleur à orienter constamment sa tête de sorte à positionner les objets d'intérêts de sa tâche directement face à la lunette afin de visualiser les informations qui y sont relatives (Syberfeldt et al., 2017). Ces orientations constantes de la tête qui, si répétées avec une grande fréquence sur une longue période, font perdre du temps au travailleur et posent également des problèmes d'ordres ergonomiques dus à la masse non négligeable de la lunette (Nichols, 1999).

Un champ visuel horizontal assez grand permettrait à la lunette d'afficher le contenu virtuel dans un large environnement visible par le travail tout en réduisant les mouvements de sa tête. En outre, plus le champ visuel est large, plus la perception de la profondeur de l'environnement est complète et précise (Drascic & Milgram, 1996) et plus la vection (sensation du mouvement du corps par rapport à son environnement) et donc l'immersion est grande (Basting, Fuhrmann, & Grunvogel, 2017).

Le choix de la lunette se fera donc en considérant prioritairement celles offrant un champ visuel aussi large que possible. Compte tenu des autres critères de sélection tous aussi importants qui pourraient contraindre à choisir une lunette offrant un champ visuel plus petit qu'une autre, il serait important de fixer un seuil de valeur acceptable. Selon Syberfeldt et al. (2017), Fraga-Lamas et al.(2018) en dessous d'une valeur de 30° en horizontal les lunettes et casques de RA n'offrent pas une expérience satisfaisante aux utilisateurs.

5.2.1.2 La masse et sa répartition sur le visiocasque

La masse est un critère très important étant donné que la lunette ou le casque de réalité mixte / augmentée est porté par le travailleur durant l'exécution de sa tâche d'assemblage. Comme énoncé précédemment, le travailleur bouge et oriente régulièrement sa tête, cou et tronc afin

de positionner les objets d'intérêts de sa tâche directement face à la lunette afin de visualiser les informations qui y sont relatives (Syberfeldt et al., 2017). Au cours de ces différents mouvements et prises de posture, des charges physiques importantes dues à la masse de la lunette et à sa répartition (Nichols, 1999) peuvent survenir sur différentes parties du corps telles que la région de la tête et du cou.

Chihara et Seo (2018) ont réalisé une étude afin d'évaluer sur quatre postures différentes *(Voir* Figure 5.3) l'influence de la masse d'un casque de réalité augmentée et de son centre de masse sur la charge de travail physique. Ils ont mené les expériences en considérant trois masses (0.8, 1.2, et 1.6 kg) et trois emplacements différents du centre de masse (–7.0, 0.0, et 7.0 cm) par rapport au centre de la tête.

Les résultats de cette étude montrent que plus la masse est élevée et le centre de masse éloigné du centre du casque, plus le couple de moments auquel est soumise l'articulation du cou augmente. Danielsson et al. (2020b) confirment également que le port d'une lunette ou un casque ayant une masse élevée entraine chez le travailleur une augmentation des contraintes physiques auxquels il est soumis.

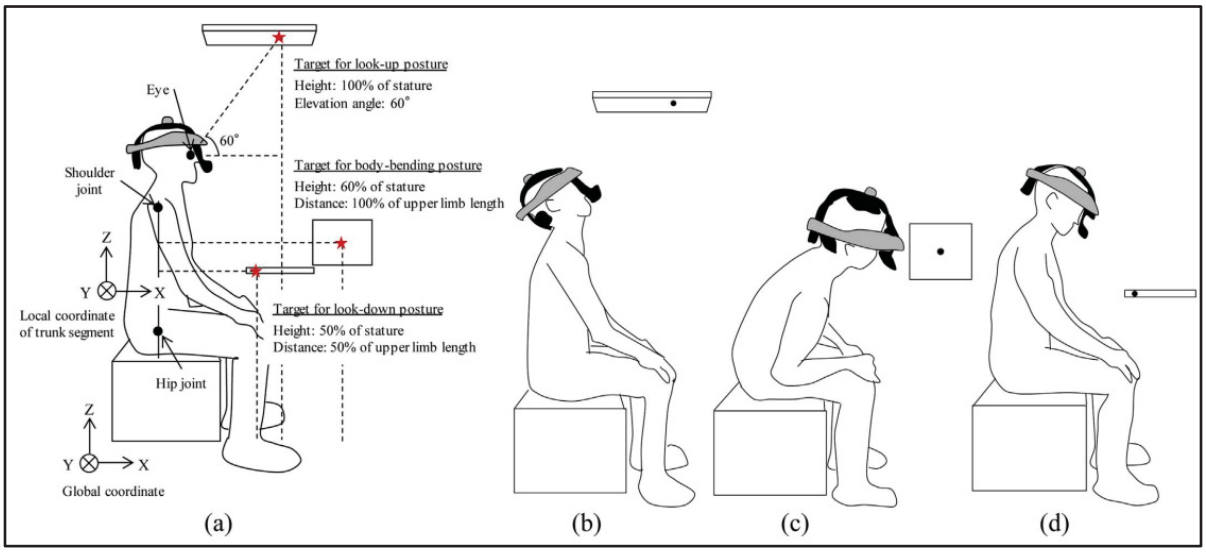


Figure 5.3 Postures d'observation avec casque de réalité augmentée: a) posture neutre; b) posture de regard vers le haut; c) flexion du corps; d) posture de regard vers le bas

Tirée de Chihara et Seo (2018)

D'autres études à l'instar de Knight & Baber (2004, 2007) ; Murray et al. (2016) ; Thuresson, Linder et Harms-Ringdahl (2003) appuient également le fait qu'une grande masse et sa répartition inégale sur la lunette ou le casque sont des variables significativement liées à une augmentation de l'activité musculaire dans la région du cou, une augmentation de la charge de travail physique et une augmentation des risques de troubles musculosquelettiques. À cela, Dizio (1992) ajoute le problème de déréglage de l'équilibre statique et dynamique expérimenté lors des expériences ou des participants portaient des casques de réalité virtuelle ayant une masse de 600g.

Pour des considérations ergonomiques, le confort des utilisateurs et l'acceptabilité de la lunette, Syberfeldt, Danielsson, et Gustavsson, (2017) recommandent de porter le choix d'une lunette sur celles dont la masse n'excède pas 100g qui est déjà 5 fois supérieur à la masse d'une lunette de prescription. Cependant, au vu des lunettes disponibles sur le marché et ayant des applications dans le secteur manufacturier, celles possédant des fonctionnalités et caractéristiques techniques recherchées dans ce projet ont une masse largement supérieure à 100g. De ce fait, à défaut de respecter la recommandation, il sera question de choisir une lunette aussi légère que possible (Chihara & Seo, 2018).

5.2.1.3 Le mode d'alimentation

En général, il existe deux principaux modes d'alimentation. La lunette peut être alimentée grâce à une batterie à laquelle peut s'adjoindre une batterie externe afin de prolonger l'autonomie de la lunette. Cette batterie externe ne nécessite généralement pas de composantes supplémentaires en dehors du câble de connexion (ne gênant pas les mouvements du travailleur) et se monte facilement sur le bâti de l'équipement. D'autres lunettes, pour fonctionner, nécessitent d'être connectées physiquement à un système externe tel qu'un ordinateur de bureau. Ce dernier mode d'alimentation n'est certainement pas le plus adapté

pour les tâches nécessitant des déplacements constants des travailleurs et une certaine liberté de mouvement (Syberfeldt et al., 2017).

5.2.1.4 L'autonomie de la batterie

La lunette doit avoir une autonomie suffisante afin de couvrir toute la durée du quart de travail qui est généralement de 8h. Pour des lunettes dont les batteries possèdent un mode de recharge rapide, l'autonomie minimale acceptable est de 4h (Syberfeldt et al., 2017). Cela permet ainsi au travailleur d'utiliser la lunette durant les 4 premières heures du quart de travail et de la mettre en charge durant la pause de diner afin de la réutiliser pour les 4 prochaines heures. Durant le choix de la lunette, à défaut d'avoir une autonomie suffisamment grande, il faut prioriser les lunettes qui permettent l'échange à chaud *(« hot-swapped »)* des batteries. L'échange à chaud consiste à remplacer la batterie déchargée par une chargée sans nécessairement éteindre la lunette au préalable et de perdre le fil du travail.

5.2.1.5 Le mode de visualisation

L'optique ou le mode de visualisation diffère selon les lunettes et la technologie implémentées pour présenter les données au travailleur. Selon Syberfeldt et al. (2017), on distingue le mode de visualisation par vidéo transparent, par optique transparente et le mode de visualisation par projection rétinienne.

❖ Le mode de visualisation par vidéo transparent

Pour le mode de visualisation par vidéo transparent, la lunette ou le casque est constitué d'un écran opaque qui empêche le travailleur d'observer le monde réel directement (Fang et al., 2023). En effet, une caméra intégrée enregistre le monde réel puis la lunette ajoute les éléments virtuels dans la vidéo avant de la transmettre au travailleur via l'écran opaque. Ce que le travailleur observe à travers son écran est totalement numérique. Ce mode de visualisation présente des inconvénients non négligeables tels que le délai de diffusion de la caméra (Syberfeldt et al.,2017) et le stress engendré chez le travailleur qui ne voit pas directement l'environnement réel (Fang et al., 2023).

❖ Le mode de visualisation par optique transparent

Contrairement au mode précédent, ici l'écran de visualisation est transparent. Les éléments virtuels sont directement superposés dans l'environnement réel observé par le travailleur (Syberfeldt et al.,2017). Klose et Schmidt (2018) dans leur étude mettent en évidence une préférence significative du mode de visualisation par optique transparent par rapport à la visualisation par vidéo transparent. Ce mode est le plus utilisé et permet de fournir de meilleures résolutions graphiques et de nombreuses fonctionnalités interactives pour une meilleure assistance des travailleurs (Fang et al., 2023). Contrairement au mode de visualisation par vidéo transparente qui cause d'importants problèmes d'équilibre dynamique et statique chez les utilisateurs, pour la visualisation par optique transparente, ces problèmes sont non significatifs (Danielsson, Holm, & Syberfeldt, 2020a).

❖ Le mode de visualisation par optique transparent

Le contenu virtuel est directement projeté sur la rétine du travailleur (Syberfeldt et al.,2017) permettant ainsi une perception plus précise des éléments virtuels dans l'environnement réel (Peillard et al., 2020). Ce mode de visualisation présente beaucoup plus d'avantages que les deux précédents, il atténue la fatigue visuelle et l'inconfort en réduisant considérablement le problème d'accommodation des yeux liés à l'utilisation des écrans de proximité conventionnels (Y. Wang, Yang, Ni, Cheng, & Wang, 2023).

En outre, l'étude comparative entre deux lunettes de réalité augmentée réalisée par Klose et Schmidt (2018) sur 40 participants a fourni des résultats intéressants quant à la préférence de l'utilisation d'une lunette monoculaire ou binoculaire de réalité augmentée. La grande majorité des participants (80%) étaient beaucoup plus satisfaits de l'utilisation d'une lunette permettant une visualisation binoculaire par rapport à une lunette monoculaire. Cela a été justifié par le fait que la visualisation monoculaire du contenu virtuel provoque de l'inconfort chez les utilisateurs, car chacun des yeux voit une image différente : un des yeux voit uniquement le monde réel et l'autre voit le monde réel augmenté.

5.2.1.6 La connectivité

Afin de faciliter la gestion des lunettes (la création et la mise à jour des flux de travail, le téléchargement des données, la connexion à la base donnée d'une l'entreprise et la connexion à d'autres équipements, etc.), elles doivent avoir la possibilité de se connecter à un réseau wifi ou un réseau local. En outre les domaines d'application tels que la téléassistance ne peuvent être possibles sans une connexion internet.

5.2.1.7 La caméra

Plus la résolution d'une caméra est élevée, plus la qualité des images et vidéos enregistrées sont meilleures (Syberfeldt et al., 2017) permettant ainsi également une meilleure téléassistance avec une vue plus claire et plus distincte de la tâche. Dès lors, une élimination directe sera effectuée pour des lunettes ne possédant pas de caméra intégrée, et une meilleure considération sera accordée à celles possédant une meilleure résolution de caméra.

5.2.1.8 Le stockage

Afin de pouvoir stocker une grande quantité de données telles que des images, des fichiers vidéos, des fichiers audios, la lunette doit disposer d'un espace de stockage aussi grand que possible. Syberfeldt et al., (2017) recommandent un espace de stockage minimum de 30 GB.

5.2.1.9 Le mode d'interaction

Le mode d'interaction peut être défini comme étant l'ensemble des moyens utilisés par un travailleur afin d'entrer les commandes à la lunette de RA/RM et d'agir sur le contenu virtuel qu'elle affiche. Il existe dans la littérature plusieurs classifications des modes d'interactions selon que les interactions sont avec contact ou sans contact (Fang et al., 2023), basées sur la vision ou non basées sur la vision (Bertarini, 2014). Lee et Hui (2018) quant à eux regroupent

les modes d'interactions en trois classes, notamment les interactions avec contact, sans contact et les interactions avec dispositif portable (*Voir* Figure 5.4).

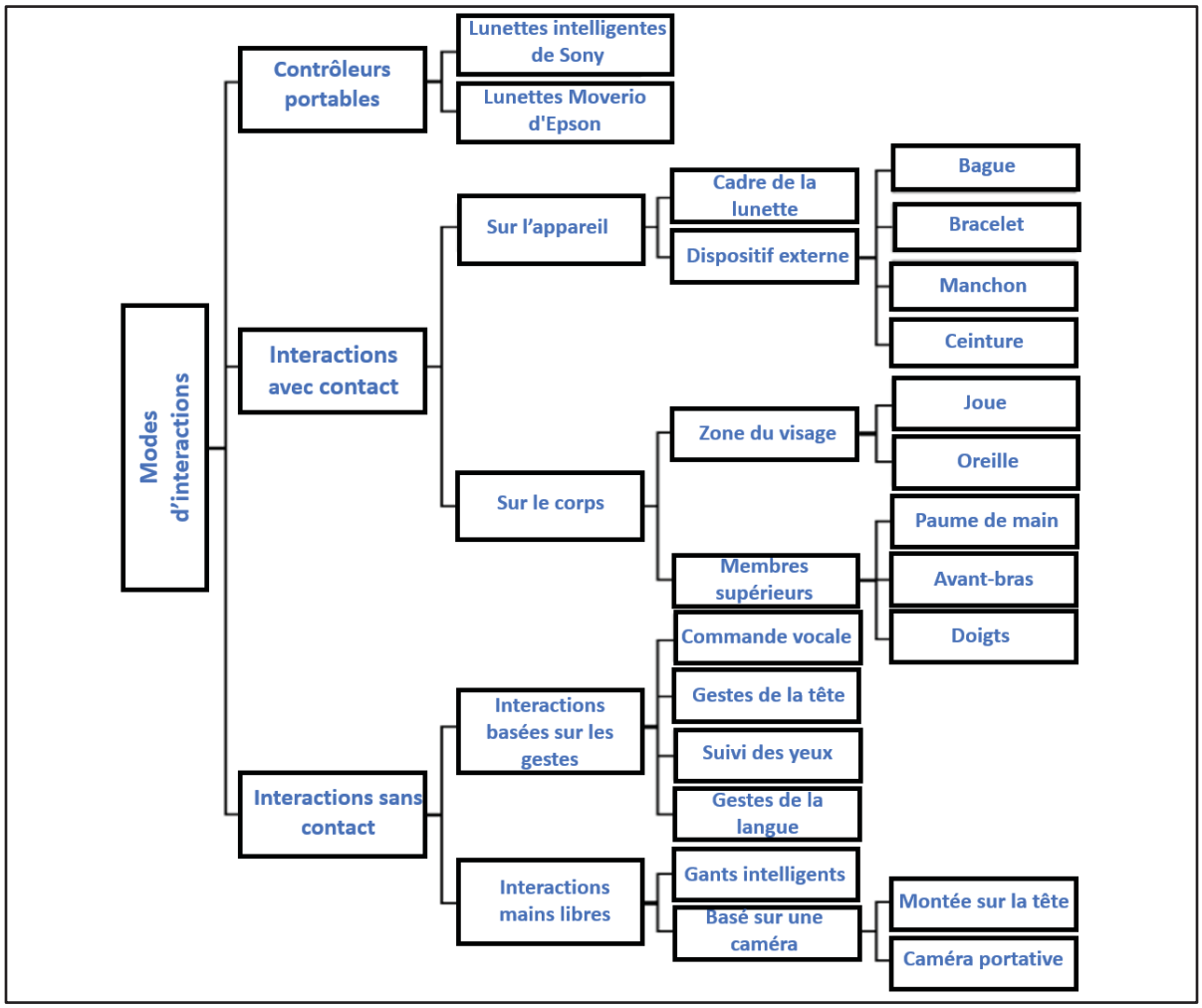


Figure 5.4 Classification des modes d'interactions avec les lunettes intelligentes
Tirée et adaptée de Lee et Hui (2018)

❖ Interaction avec contact

Ce mode d'interactions englobe la commande de la lunette par pavé tactile et boutons ou capteurs de pression et ne nécessite l'utilisation que d'une main pour le contrôle de la lunette et n'impose pas le port d'un dispositif supplémentaire.

Le pavé tactile permettant l'entrée des commandes est de petite dimension et son utilisation requière de ce fait une certaine dextérité de la part du travailleur. À titre d'exemple, la saisie

d'un texte : durant cet exercice, le travailleur doit sélectionner les différentes lettres sur un clavier virtuel par balayage du pavé tactile (*Voir* Figure 5.5). D'un point de vue pratique, l'exécution des tâches nécessitant une interaction répétitive constante entre le travailleur et la lunette devient très vite lassante (Lee & Hui, 2018).

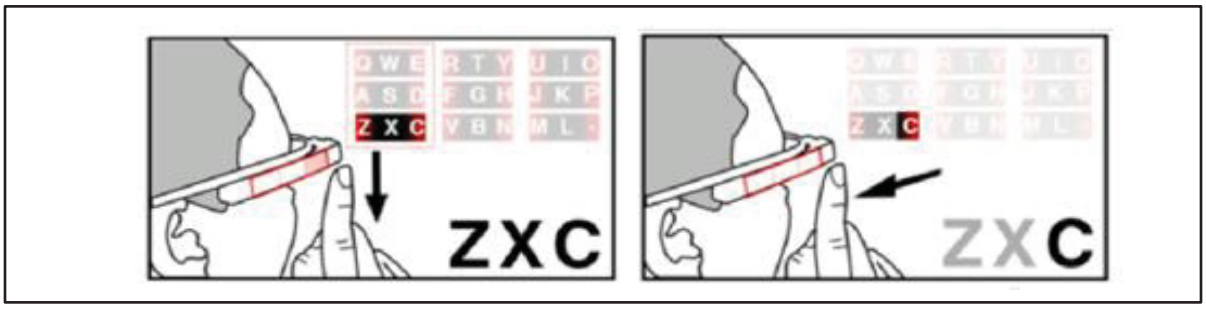


Figure 5.5 Commande d'une lunette intelligente via son pavé tactile
Tirée de Lee et Hui (2018)

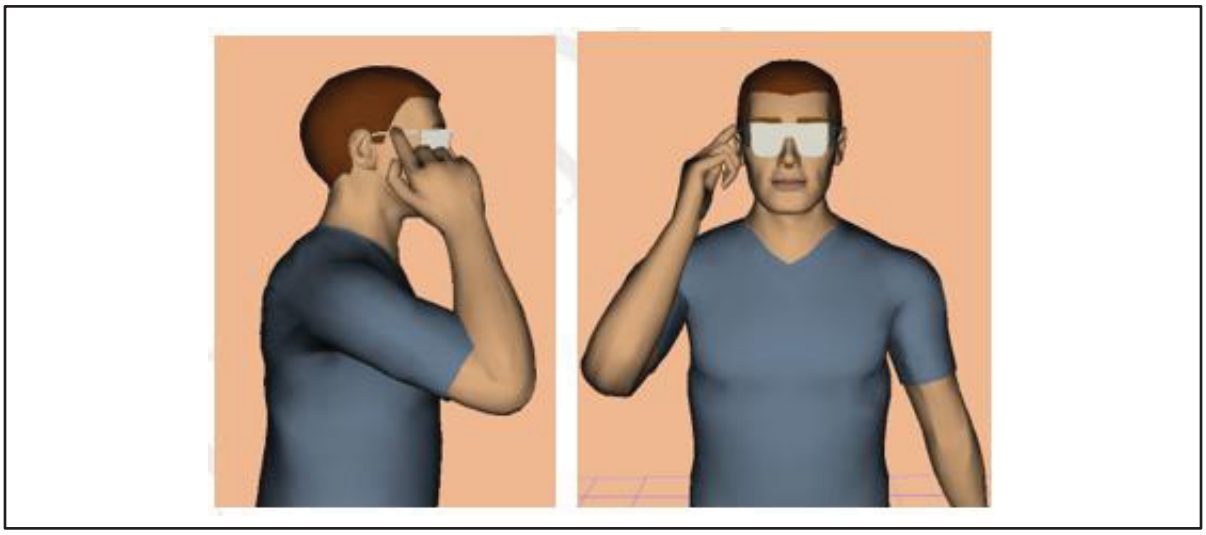


Figure 5.6 Posture adoptée par le travailleur lors de l'utilisation du pavé tactile de la lunette

La posture du bras adoptée par le travailleur lors de l'utilisation du pavé tactile n'est pas une posture neutre. D'un point de vue ergonomique, le maintien ou la répétitivité de cette posture sur une longue période peut conduire à une augmentation significative de l'activité et de la fatigue musculaire (Kang & Shin, 2017 ; Kar, Vu, Juliá Nehme, & Hedge, 2015), l'inconfort des épaules et des risques de troubles musculosquelettiques des membres supérieurs (Shin & Zhu, 2011).

❖ Interaction via contrôleur portable

Pour ce mode d'interactions, il y a également nécessité de contact entre la (les) main(s) du travailleur et le dispositif de commande. Cependant, ici, le dispositif de commande n'est pas intégré à la lunette. En effet ce mode d'interactions consiste en l'utilisation d'un dispositif externe portable permettant au travailleur d'entrer les commandes et interagir avec l'interface digitale de la lunette (Lee & Hui, 2018). Le dispositif ou contrôleur externe peut être un téléphone, une manette, un clavier, un pavé tactile, un anneau ou un bracelet intelligent. Ce mode d'interactions impose au travailleur de retirer au moins une de ses mains de la tâche chaque fois qu'il doit commander la lunette.

❖ Interaction sans contact

Contrairement aux deux autres modes, ici les mains du travailleur n'entrent pas en contact ni avec la lunette ni avec un dispositif externe de contrôle. Il peut être subdivisé en deux catégories à savoir, les interactions avec les mains, telles que la reconnaissance gestuelle des mains et les interactions mains libres.

- Interactions basées sur les gestes

Ces interactions sont réalisées soit grâce à un port de gant intelligent soit à mains nues grâce à la technologie des caméras de profondeurs intégrées à la lunette qui détectent les mouvements des mains et les associe ensuite à des commandes spécifiques (Fang et al., 2023 ; Z. B. Wang, Ong, & Nee, 2013). La lunette ou le casque de réalité augmentée affiche le contenu virtuel dans le champ visuel du travailleur à une certaine distance de lui et à une certaine hauteur du sol. Dans le cas des interactions à mains nues, les mouvements du travailleur doivent obligatoirement être exécutés dans le champ visuel des caméras afin de permettre leur détection et leur reconnaissance. Le travailleur doit alors adopter des postures non neutres prolongées des bras, principalement des abductions frontales des bras (Nichols, 1999) et exécutées de grandes amplitudes de mouvements pour naviguer dans le contenu virtuel (*Voir* Figure 5.7).

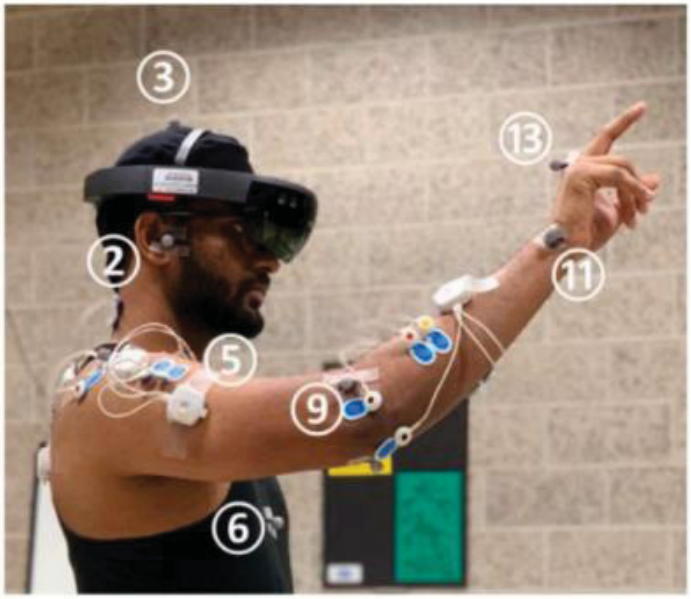


Figure 5.7 Interactions par reconnaissance gestuelle
Tirée de Kim, Ari, Madasu, et Hwang (2020)

Du point de vue ergonomique, ceci implique chez le travailleur une augmentation significative de l'inconfort musculosquelettique dans la région des épaules et du cou (J. H. Kim, Ari, Madasu, & Hwang, 2020) et le risque de blessures (Penumudi, Kuppam, Kim, & Hwang, 2020) et de la fatigue musculaire (Lee & Hui, 2018).

Néanmoins, pour réduire ces risques, il existe des recommandations quant à la conception de l'interface virtuelle projetée par la lunette. En effet, les résultats de l'étude de Penumudi et al.(2020) montrent qu'une réduction de la charge musculosquelettique et de l'inconfort peut être obtenue lorsque l'interface virtuelle est affichée entre la hauteur des yeux et 15° en dessous de la hauteur des yeux. Pour ce qui est de la distance, Kim et al. (2020) révèlent de leur côté une baisse significative de l'activité musculaire lorsque l'interface virtuelle est affichée près du travailleur.

Dans le cas de l'interaction avec un gant intelligent, le travailleur n'a pas besoin de lever sa main afin d'exécuter ses mouvements dans le champ des caméras de lunette. En effet, les mouvements de la main sont détectés par les capteurs contenus dans le gant puis interprétés et associés à des commandes spécifiques qui agissent sur l'interface virtuelle (Gu et al., 2023). De ce fait, le travailleur peut garder une posture naturelle et exécuter des mouvements de façon intuitive. Cependant, en raison de son prix élevé, son caractère invasif et inconfortable (Fang et al., 2023), de la perte de la dextérité et de la coordination lors du port de gant (Mishra, Sharma, & Hakani, 2023), la méthode de l'utilisation des gants intelligents comme moyen d'interactions avec l'interface virtuel de la lunette est peu acceptée par les utilisateurs.

- Interaction mains libres

Cette catégorie comprend les interactions par mouvements de la tête, par commande vocale, et par le suivi du regard (Fang et al., 2023 ; Lee & Hui, 2018). Toutes ces dernières permettent à l'utilisateur de manipuler les données virtuelles et de commander la lunette sans avoir à retirer une de ses mains de la tâche en cours d'exécution.

Du point de vue pratique, la commande vocale offre un moyen d'interactions intuitives et réaliste à moindre coût et offre également plus de flexibilité et de liberté de mouvements des mains tout en réduisant les erreurs lors de l'exécution des tâches (Aouam, Benbelkacem, Zenati, Zakaria, & Meftah, 2018). En revanche, l'utilisation de ce mode d'interactions fait face à une restriction non négligeable. En effet, la lunette doit être utilisée dans un environnement à faible niveau de bruit (Heilemann, Zimmermann, & Münster, 2022 ; Lee & Hui, 2018) afin de pouvoir comprendre et exécuter la commande émise vocalement par l'utilisateur. L'activation accidentelle des commandes par une interprétation erronée des bruits environnants est un souci supplémentaire auquel le mode d'interactions par commande vocale est confronté.

L'interaction entre l'interface virtuelle de la lunette et l'utilisateur via les mouvements des yeux est réalisée grâce à des caméras de suivi du regard intégrées dans la lunette (Fang et al., 2023 ; Heilemann et al., 2022 ; Lee & Hui, 2018). Grâce à ces caméras, la lunette est capable

de savoir où l'utilisateur regarde, mettre en surbrillance et sélectionner en conséquence l'élément dans l'interface virtuel (Namnakani, Abdrabou, Grizou, Esteves, & Khamis, 2023). Un des avantages de ce mode d'interactions par rapport au précédent est qu'il peut être utilisé même dans un milieu bruyant. Le mouvement des yeux est un moyen naturel et rapide d'interactions avec la lunette (Fang et al., 2023). En effet, les études d'efficacité et d'efficience réalisées par Monteiro, Gonçalves, Peixoto, Melo, et Bessa (2023) sur les moyens d'interactions les plus utilisés ont montré que les performances des participants dans les tâches étaient meilleures lors de l'utilisation du suivi du regard comme moyen d'interactions.

L'interaction via les mouvements de la tête est réalisée principalement grâce aux dispositifs tels l'accéléromètre et le gyroscope intégrés à la lunette (Lee & Hui, 2018). Les mouvements de la tête se résument principalement à des pivotements à gauche, droite, haut et bas afin d'effectuer des sélections dans l'interface virtuelle. Du fait des considérations ergonomiques (intensité et fréquence des mouvements de la tête), ce mode d'interactions est considéré comme le moins approprié pour les différentes applications des casques et lunettes de réalité augmentée (Fang et al., 2023 ; Lee & Hui, 2018).

Une utilisation combinée de plusieurs modes d'interactions permet à la fois de jouir des avantages qu'offre chaque mode d'interaction et de compenser les défauts de chacun de ces derniers par les fonctionnalités qu'offrent les autres (Chopra & Maurer, 2020). En effet, une combinaison du suivi du regard, reconnaissance des gestes et commande vocale fusionne les avantages de chacun de ces modes d'interaction, améliore l'expérience utilisateur et la précision dans les commandes par rapport à chacun de ces modes pris séparément (Z. Wang, Wang, Yu, & Lu, 2021).

5.2.1.10 Mémoire et processeur

Les caractéristiques du processeur influencent la fluidité avec laquelle la lunette exécute les applications et les fonctionnalités de la réalité augmentée. De même, la capacité de la mémoire

vive influence la vitesse de traitement des données et les délais de réponse de la lunette aux entrées de l'utilisateur. Syberfeldt et al., (2017) recommandent un minimum de 2GB de mémoire et un processeur ayant minimalement la capacité d'un dual core. Avec les avancées technologiques et les évolutions dans les domaines de la réalité augmentée et mixte, il est assez commun de nos jours que les lunettes possèdent des capacités largement au-dessus des recommandations minimales faites en 2017 par Syberfeldt et son équipe.

5.2.2 Hiérarchisation du problème

L'objectif est de choisir la meilleure alternative parmi les lunettes présélectionnées en se basant sur les critères de comparaison définis dans la section précédente. Le problème se présente sous une forme hiérarchique de quatre niveaux (*Voir* Figure 5.9) ;

- Le premier niveau constitue l'objectif ; en d'autres termes le besoin qui a conduit à mise en place de l'Analytical Hierarchy Process (AHP).
- Le deuxième niveau est constitué par les trois groupes de critères de comparaison retenus pour l'étude.
- Le troisième niveau est constitué des sous-critères à la base desquels les comparaisons binaires entre les alternatives seront réalisées
- Le dernier niveau est constitué par les alternatives, c'est-à-dire les différents visiocasques ou lunettes de RA/RM pouvant possiblement répondre à l'objectif de l'étude.

Par ailleurs, la méthode de l'AHP étant basée sur des comparaisons binaires, elle est sujette à quelques limites liées à son principe même de fonctionnement. En effet, la difficulté de son application (Rivest, 2020) et les risques d'erreurs de jugement (Triantaphyllou, 1999) croissent avec le nombre d'éléments (alternatives ou critères) à comparer.

Afin de réduire le nombre de comparaisons à effectuer et donc de minimiser les risques d'erreurs lors de la mise en œuvre de l'AHP dans cette étude, nous avons procédé à une

présélection des lunettes (*Voir* Figure 5.8). Pour cela, nous avons préalablement sélectionné dans la multitude de lunettes existant sur le marché, celles qui sont les plus utilisées dans le secteur manufacturier. Nous avons favorisé celles possédant la technologie récente tout en considérant la maturité technologique de ces derniers. De ce fait, nous n'avons pas inclus dans notre liste, les visiocasques récemment mis sur le marché, car n'ayant pas suffisamment de retours d'expérience des utilisateurs de ces dernières. Leur efficacité et leur fiabilité n'étant pas encore pleinement validées, il nous est apparu plus prudent de ne pas les inclure dans notre présélection. Un produit doit avoir fait ses preuves avant d'être largement adopté ou suggéré au partenaire industriel. En effet afin de garantir la pertinence et la qualité des produits, nous avons privilégié des visiocasques éprouvés et fiables qui bénéficient d'un retour d'expérience positif.

Nous avons également procédé à certaines éliminations par dominance apparente entre les visiocasques provenant du même fabricant.

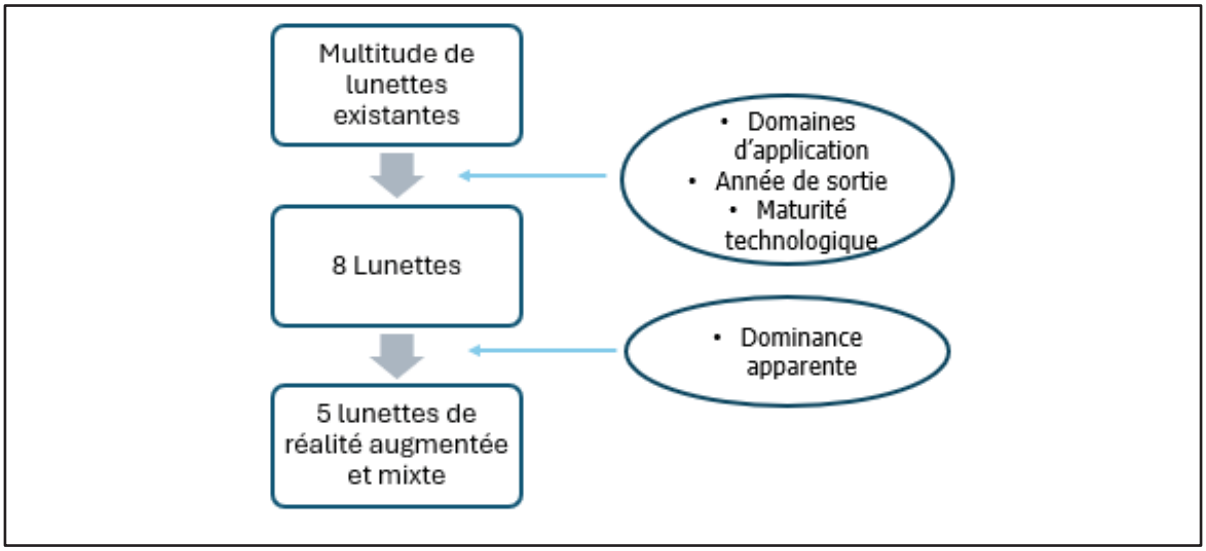


Figure 5.8 Présélection des visiocasques

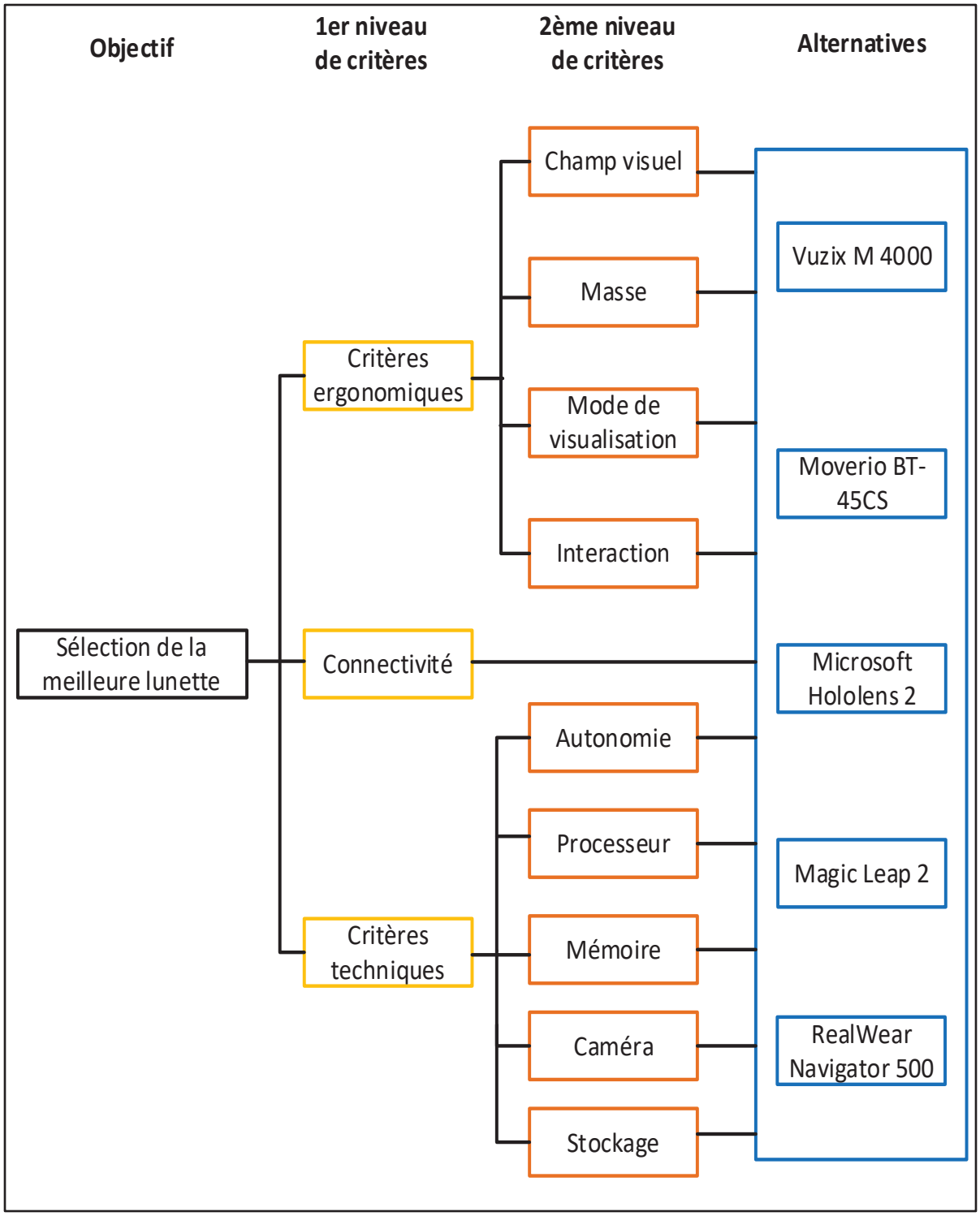


Figure 5.9 Hiérarchisation du choix de la meilleure lunette

5.2.3 Établissement des priorités relatives entre les groupes de critères et entre les sous-critères

Après avoir hiérarchisé le problème, il est question par la suite de procéder à des comparaisons par paire des éléments de chaque niveau hiérarchique par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire les matrices de comparaison en transformant des jugements en valeur numérique selon l'échelle de Saaty (2008) tout en respectant la réciprocité.

Échelle numérique	Échelle verbale
1.0	Importance égale des deux éléments
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Figure 5.10 Échelle de Saaty
Tirée de Nadeau et al. (2010)

La transformation des jugements en valeur numérique permet d'obtenir les matrices de comparaison et de calculer le poids de chaque critère par rapport au niveau hiérarchique supérieur.

5.2.3.1 Établissement de la matrice de comparaison du premier niveau de critères

Compte tenu des sous-critères contenus dans le groupe de critères ergonomiques, et de l'impact direct (inconfort, contraintes physiques, activité et fatigue musculaire et visuelle) de ses sous-critères (masse, interaction, champ visuel) sur les travailleurs, nous le jugeons comme étant un élément beaucoup plus important (8) que le critère de connectivité. Il est également considéré

comme étant plus important (5) que le groupe de critères techniques qui ne contient que les sous-critères liés aux performances matérielles des alternatives. Le critère de connectivité quant à lui n'a aucun impact ni sur les travailleurs ni sur les performances des alternatives, mais demeure cependant non négligeable du fait qu'il conditionne l'utilisation d'une lunette, sa facilité d'intégration et son comportement dans un système connecté. De ce fait, la connectivité est considérée comme étant beaucoup moins importante (1/8) que les critères ergonomiques et un peu moins important (1/3) que les critères techniques.

Le tableau ci-dessous présente la matrice de comparaison des critères de premier niveau par rapport à l'objectif qui est de sélectionner la meilleure lunette.

Tableau 5.2 Matrice de comparaison des critères du 1er niveau hiérarchique

Critères	Critères ergonomiques	Connectivité	Critères techniques
Critères ergonomiques	1,00	8,00	5,00
Connectivité	0,13	1,00	0,33
Critères techniques	0,20	3,00	1,00

Les calculs exécutés sur Excel grâce au logiciel XLSTAT ont permis d'avoir les poids relatifs de chacun des groupes de critères (*Voir* Figure 5.11).

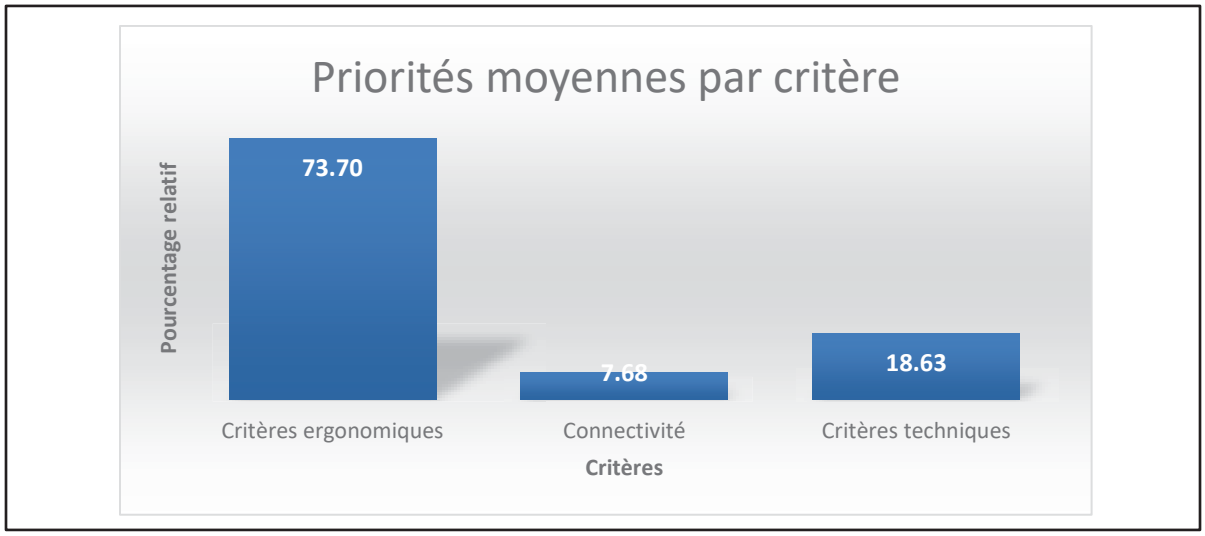


Figure 5.11 Poids des critères du 1er niveau hiérarchique

5.2.3.2 Établissement de la matrice de comparaison du deuxième niveau de critères : critères ergonomiques

Un faible champ de vision affecte la posture de travail (Chihara & Seo, 2018), la fréquence et l'intensité des mouvements de la tête et du cou (Nichols, 1999). Une résolution d'affichage faible affecte l'efficacité de la lunette et l'expérience de l'utilisateur (Nichols, 1999). Considérant ces points, Nichols (1999) propose qu'il est plus approprié d'avoir une lunette lourde, mais possédant des caractéristiques plus appropriées au niveau du champ de vision et de la résolution d'affiche. Partant de cela, il a été décidé d'accorder une plus grande priorité sur ces deux sous critères par rapport aux autres critères ergonomiques. Un champ visuel environnant 20° peut convenir à des applications comme le sport ou le tourisme, mais est insuffisant pour une application industrielle, rendant la lunette pratiquement inutilisable (Syberfeldt et al., 2017). De ce fait, le critère champ visuel et le mode de visualisation sont considérés respectivement comme étant beaucoup plus important (7) et plus important (5) que la masse.

Comme énoncé dans la section de définition des critères de sélection, la masse de la lunette et les interactions que l'utilisateur a avec elle ont des impacts directs sur la contrainte physique, le confort et l'activité musculaire de l'utilisateur. Cependant, contrairement à la masse qui est fixe pour une lunette, les interactions offrent des possibilités de palliations sur certains de ces impacts. En effet, par exemple, pour limiter les mouvements des mains et bras au-dessus du cœur lors des interactions avec la lunette, l'utilisateur peut parfois recourir aux commandes vocales ou aux commandes par le suivi du regard. De ce fait, une priorité doit être accordée à la masse par rapport aux interactions. Le sous-critère masse sera donc considéré comme étant un peu plus important (3) que le sous-critère interactions. À ce niveau, l'importance du mode de visualisation par rapport aux autres sous critères peut être déduite de l'importance déjà établie du champ visuel par rapport à ces mêmes sous critères : il sera plus important (5) que la masse et beaucoup plus important (7) que les interactions.

Le Tableau 5.3 ci-dessous présente la matrice de comparaison des quatre sous critères par rapport au critère de premier niveau hiérarchique qui les regroupe à savoir les critères ergonomiques.

Tableau 5.3 Matrice de comparaison des sous-critères ergonomiques

Sous-critères	Champ visuel	Masse	Mode de visualisation	Interaction
Champ visuel	1,00	7,00	3,00	8,00
Masse	0,14	1,00	0,20	3,00
Mode de visualisation	0,33	5,00	1,00	7,00
Interaction	0,13	0,33	0,14	1,00

Les calculs exécutés sur Excel grâce au logiciel XLSTAT ont permis à partir de ce tableau de déterminer les poids relatifs de chacun de ces sous-critères (*Voir* Figure 5.12).

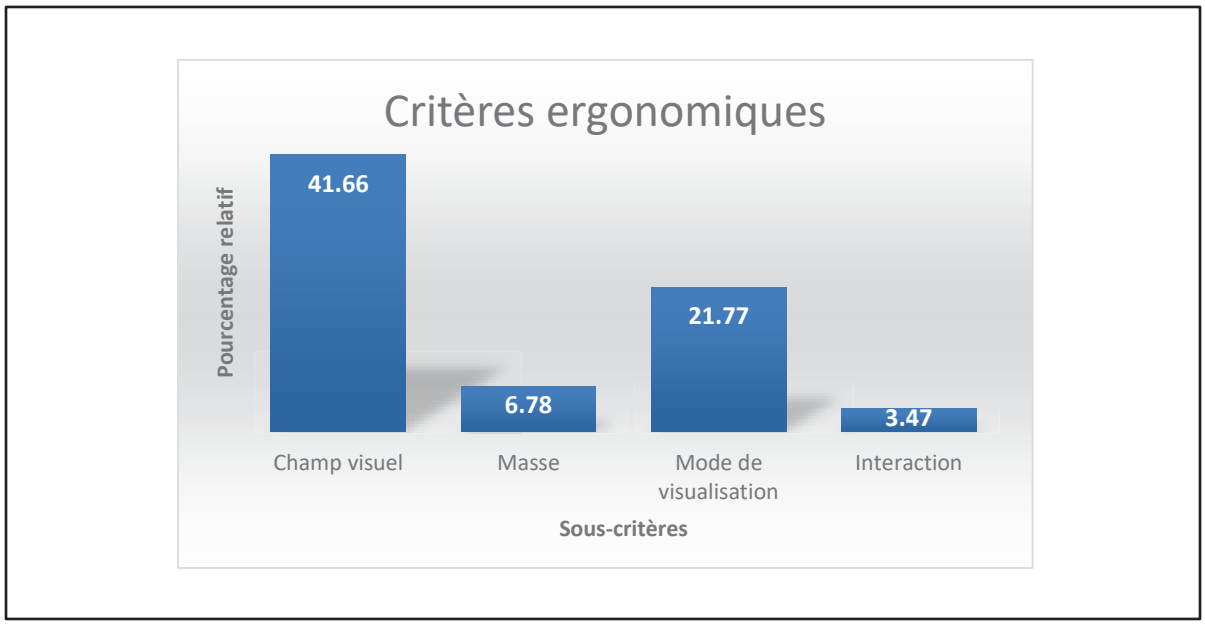


Figure 5.12 Poids des sous-critères ergonomiques

5.2.3.3 Établissement de la matrice de comparaison du deuxième niveau de critères : critères techniques

Le processeur est la composante principale d'un système informatique chargé de l'exécution des différentes instructions et la RAM quant à elle est la mémoire principale de l'ordinateur dans laquelle de nombreux processus sont exécutés en temps réel. Tous les deux sont des composantes primordiales pour assurer un fonctionnement satisfaisant de la lunette. En effet, ils sont tous deux liés à la vitesse de traitement des données dans la lunette telle que la reconnaissance de la géométrie des éléments en réalité augmentée, la superposition des éléments virtuels dans le monde réel, la reconnaissance gestuelle, le délai de réponse de l'interface virtuelle aux entrées de l'utilisateur, etc. De faibles caractéristiques de ces deux critères dans une lunette affectent la performance des travailleurs dans les tâches utilisant l'interface virtuelle (Nichols, 1999) et causent des problèmes de stabilité posturale (Barrett, 2004). Le processeur est alors considéré comme étant d'importance presque égale (2) à la mémoire, plus important (5) que l'autonomie et beaucoup plus important que le stockage et la caméra (respectivement 8 et 7).

L'autonomie est le troisième critère le plus important après le processeur et la mémoire. Elle doit permettre à la lunette de supporter le travailleur durant toute la durée de la tâche avec le minimum possible d'arrêt pour la recharge ou le changement de batterie. La caméra est nécessaire pour rendre possibles la téléassistance des travailleurs et la documentation des rapports de travail (Syberfeldt et al., 2017). Cependant, nous la considérons comme un peu moins importante (1/3) que l'autonomie de la lunette. Dans cette liste de sous critères, le stockage est l'élément ayant le moins d'importance, car la lunette ayant la possibilité de se connecter à la base de données de l'entreprise via un réseau wifi, elle ne nécessitera pas le téléchargement des données de travail, mais une utilisation en ligne de ces dernières.

L'autonomie et la caméra seront considérées comme étant respectivement beaucoup plus importante (7) et plus importante (5) que le sous-critère de stockage.

Le Tableau 5.4 Matrice de comparaison des critères des sous-critères techniques ci-dessous présente la matrice de comparaison des cinq sous critères par rapport au critère de premier niveau hiérarchique qui les regroupe à savoir critères techniques.

Tableau 5.4 Matrice de comparaison des critères des sous-critères techniques

Sous-critères	Autonomie	Processeur	Mémoire	Caméra	Stockage
Autonomie	1,00	0,20	0,33	3,00	7,00
Processeur	5,00	1,00	2,00	7,00	8,00
Mémoire	3,00	0,50	1,00	6,00	7,00
Caméra	0,33	0,14	0,17	1,00	5,00
Stockage	0,14	0,13	0,14	0,20	1,00

Les calculs exécutés sur Excel grâce au logiciel XLSTAT ont permis à partir de ce tableau de déterminer les poids relatifs de chacun de ces sous-critères (*Voir* Figure 5.13).

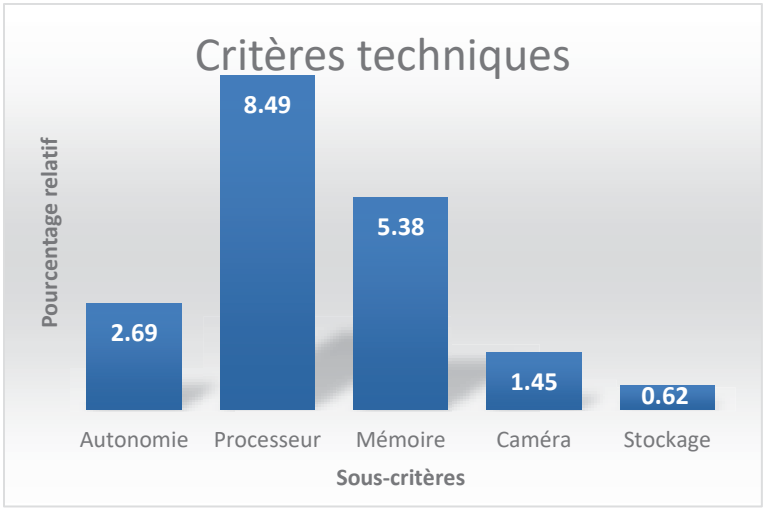


Figure 5.13 Poids des sous-critères techniques

5.2.4 Établissement des matrices de comparaison des alternatives par rapport aux critères

Ayant déjà à disposition le poids de chaque groupe de critères et sous critère de comparaison, il est question ici de procéder aux comparaisons binaires des alternatives sur chacun des sous-critères en se basant sur l'échelle de Saaty (2008). Cela est réalisé en comparant les valeurs numériques par critère des lunettes contenues dans le tableau d'ANNEXE VI. En ce qui concerne les critères non quantifiables tels que le mode de visualisation et les interactions, nous nous sommes pris autrement.

Pour le mode de visualisation par exemple, en nous appuyant sur la revue de littérature effectuée au préalable, nous avons accordé une plus grande priorité aux lunettes binoculaires ou de type visière dont le mode de visualisation est optique transparente. Les lunettes monoculaires optiques transparentes venaient après et les lunettes dont le mode est vidéo transparent venaient en dernier. Concernant le mode d'interaction, les lunettes offrant une large variété de mode et une plus grande flexibilité d'interaction étaient prioritaires.

Les matrices obtenues à la suite des comparaisons binaires sont les suivantes :

Tableau 5.5 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère champ visuel

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	5,00	8,00	7,00	9,00
Hololens 2	0,20	1,00	7,00	5,00	8,00
Vuzix M4000	0,13	0,14	1,00	0,33	3,00
Moverio BT-45CS	0,14	0,20	3,00	1,00	5,00
Realwear navigator 500	0,11	0,13	0,33	0,20	1,00

Tableau 5.6 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère masse

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	7,00	0,25	8,00	2,00
Hololens 2	0,14	1,00	0,11	0,50	0,13
Vuzix M4000	4,00	9,00	1,00	9,00	5,00
Moverio BT-45CS	0,13	2,00	0,11	1,00	0,13
Realwear navigator 500	0,50	8,00	0,20	8,00	1,00

Tableau 5.7 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère mode de visualisation

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	2,00	8,00	7,00	9,00
Hololens 2	0,50	1,00	7,00	6,00	9,00
Vuzix M4000	0,13	0,14	1,00	0,25	3,00
Moverio BT-45CS	0,14	0,17	4,00	1,00	3,00
Realwear navigator 500	0,11	0,11	0,33	0,33	1,00

Tableau 5.8 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère interactions

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	2,00	8,00	9,00	5,00
Hololens 2	0,50	1,00	7,00	9,00	5,00
Vuzix M4000	0,13	0,14	1,00	3,00	0,20
Moverio BT-45CS	0,11	0,11	0,33	1,00	0,14
Realwear navigator 500	0,20	0,20	5,00	7,00	1,00

Tableau 5.9 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au critère connectivité

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	5,00	7,00	9,00	4,00
Hololens 2	0,20	1,00	3,00	7,00	0,50
Vuzix M4000	0,14	0,33	1,00	5,00	0,33
Moverio BT-45CS	0,11	0,14	0,20	1,00	0,17
Realwear navigator 500	0,25	2,00	3,00	6,00	1,00

Tableau 5.10 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère autonomie

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	3,00	0,11	2,00	0,17
Hololens 2	0,33	1,00	0,11	1,00	0,14
Vuzix M4000	9,00	9,00	1,00	9,00	5,00
Moverio BT-45CS	0,50	1,00	0,11	1,00	0,20
Realwear navigator 500	6,00	7,00	0,20	5,00	1,00

Tableau 5.11 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère processeur

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	7,00	9,00	9,00	8,00
Hololens 2	0,14	1,00	3,00	3,00	4,00
Vuzix M4000	0,11	0,33	1,00	1,00	0,33
Moverio BT-45CS	0,11	0,33	1,00	1,00	1,00
Realwear navigato	0,13	0,25	3,00	1,00	1,00

Tableau 5.12 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère mémoire

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	9,00	7,00	8,00	8,00
Hololens 2	0,11	1,00	0,20	2,00	2,00
Vuzix M4000	0,14	5,00	1,00	6,00	6,00
Moverio BT-45CS	0,13	0,50	0,17	1,00	1,00
Realwear navigator 500	0,13	0,50	0,17	1,00	1,00

Tableau 5.13 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère caméra

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	6,00	1,00	0,50	0,13
Hololens 2	0,17	1,00	0,17	0,17	0,11
Vuzix M4000	1,00	6,00	1,00	0,50	0,13
Moverio BT-45CS	2,00	6,00	2,00	1,00	0,14
Realwear navigator 500	8,00	9,00	8,00	7,00	1,00

Tableau 5.14 Matrice de comparaison des alternatives par rapport au sous-critère stockage

Alternatives	Magic Leap 2	Hololens 2	Vuzix M4000	Moverio BT-45CS	Realwear navigator 500
Magic Leap 2	1,00	7,00	7,00	0,14	7,00
Hololens 2	0,14	1,00	1,00	0,11	1,00
Vuzix M4000	0,14	1,00	1,00	0,11	1,00
Moverio BT-45CS	7,00	9,00	9,00	1,00	9,00
Realwear navigator 500	0,14	1,00	1,00	0,11	1,00

Compte tenu des biais possibles des jugements durant la comparaison par paire, il est très important de vérifier la cohérence des matrices de comparaison afin d'éviter de donner des poids erronés aux critères et donc de fausser le résultat de l'étude.

La vérification se fait en calculant le ratio de cohérence RC et en le comparant à la valeur de 10%, dès lors deux cas sont possibles :

- RC< 10% alors la matrice de comparaison est cohérente ;
- RC≥10% la matrice n'est pas cohérente et dans ce cas les comparaisons par paires doivent être révisées.

Le tableau ci-dessous regroupe les valeurs des ratios de toutes les matrices de comparaison établies dans cette étude. Le détail des calculs de ces ratios est donné dans l'ANNEXE VII.

Tableau 5.15 Ratio de cohérence des matrices de comparaison

Matrice de comparaison	**Ratio de cohérence**
Critères du 1er niveau hiérarchique	3,83%
Sous critères ergonomiques	7,82%
Sous critères techniques	9,44%
Alternatives par rapport au sous-critère champ visuel	9,51%
Alternatives par rapport au sous-critère masse	9,85%
Alternatives par rapport au sous-critère mode de visualisation	9,07%
Alternatives par rapport au sous-critère interactions	9,81%
Alternatives par rapport au critère connectivités	7,98%
Alternatives par rapport au sous-critère autonomie	7,6%
Alternatives par rapport au sous-critère processeur	8,61%
Alternatives par rapport au sous-critère mémoire	8,87%
Alternatives par rapport au sous-critère caméra	9,36%
Alternatives par rapport au sous-critère stockage	8,58%

Tous les ratios étant inférieurs à 10%, il est alors possible de considérer toutes les matrices de comparaison précédentes comme étant cohérentes et valables.

5.2.5 Résultat de l'AHP

La compilation de tous ces calculs donne le graphique présenté ci-dessous. Nous pouvons y voir que la ML2 domine significativement tous les autres visiocasques et ce sur quasiment tous les critères. La ML2 st suivi de la MH2 qui est également dominante sur le reste des visiocasques.

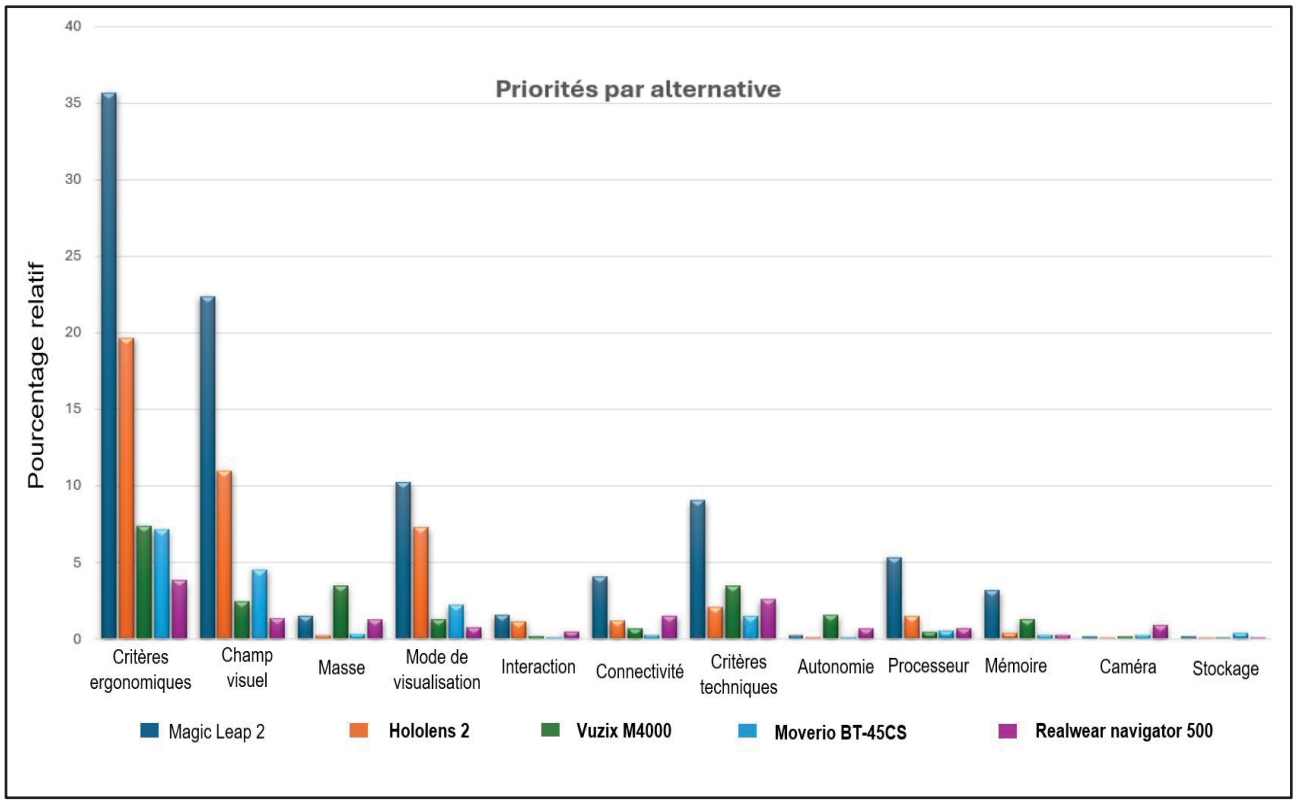


Figure 5.14 Résultat de l'AHP

Nous avons choisi de retenir les deux visiocasques les mieux classés pour poursuivre les analyses. Cette décision a été prise afin d'éviter le risque de ne sélectionner que le visiocasque le mieux classé, puis de découvrir par la suite qu'il ne satisfait pas aux critères d'acceptabilité pratique ou d'utilisabilité.

5.3 Évaluation de l'acceptabilité pratique et de l'utilisabilité

Dans la littérature diverses méthodes sont utilisées pour évaluer l'acceptabilité. Les points communs entre ces méthodes sont les critères d'évaluation utilisés et l'implication des participants humains dans le processus. Ce dernier point constitue une limite dans le cadre de notre étude. Dès lors, nous évaluons conjointement l'acceptabilité pratique et l'utilisabilité de la Magic Leap 2 et de la Microsoft Hololens 2 à partir des connaissances de base en ergonomie et des résultats obtenus des travaux similaires d'autres équipes de recherche.

Le premier critère d'évaluation est la satisfaction des utilisateurs. D'un point de vue purement technique, des études menées par Basoglu et al. (2017), Wang et al., (2023) sur des lunettes technologiquement (champ de vision, mode d'interactions, puissance de traitement, etc.) inférieures à la ML2 et à la MH2 montrent que ces dernières possèdent des caractéristiques largement suffisantes pour satisfaire aux besoins des utilisateurs.

Pour les autres critères, nous allons évaluer les deux lunettes séparément.

5.3.1 Magic Leap 2

5.3.1.1 Confort et design

La ML2 affiche un design discret et esthétique, c'est un casque de petite taille, similaire à de simples lunettes, contrairement à la MH2 qui est un casque volumineux avec un design de type visière.

En ce qui concerne le confort lors du port des lunettes ou des casques de réalité augmentée, Kim et al. (2021) dans leur travail ont souligné que les inconforts physiques provenaient, entre autres, de la pression qu'exerce le casque sur les parties du corps qui supportent la masse de la lunette notamment les oreilles et l'arête nasale. Le manque d'ajustements adéquats du casque sur le nez est selon eux une autre source d'inconfort. Pour le dernier point soulevé, la ML2 est fournie avec un kit permettant de personnaliser l'ajustement du casque avec 4 coussinets

nasaux et 2 coussinets frontaux de tailles différentes. La conception du cadre de la ML2 en raison de sa bande arrière permet l'ajustement automatiquement de la taille du casque sur la tête de l'utilisateur et évite que le casque repose sur les oreilles. Un soutien supplémentaire peut être apporté grâce à la sangle supérieure fournie dans la boite du produit et qui peut être installée sur le dessus du casque. Ceci garantit un meilleur confort du casque même s'il est porté sur une longue période. Les oreilles ne sont pas soumises au poids du casque ; une petite partie du poids est supportée par l'arête nasale et la grande partie par la partie supérieure de la tête.

Une répartition inégale du poids du casque particulièrement entre le côté gauche et le côté droit est également une des principales causes d'inconfort physique signalé par les utilisateurs (Brusie et al., 2015 ; Chang et al., 2014 ; Pose-Díez-de-la-Lastra et al., 2022). Ce problème n'est pas présent avec la ML2 qui a un poids parfaitement équilibré.

La technologie de la gradation dynamique (dynamic dimming) présente dans la ML2 permet d'améliorer l'expérience visuelle des utilisateurs et contribue à la réduction de la fatigue oculaire lors d'utilisation prolongée (Hoffman, Stepien, & Xiong, 2016). Cette fonctionnalité améliore le confort visuel et la qualité du contenu virtuel affiché en ajustant automatiquement la luminosité des écrans en fonction du contenu affiché et de la luminosité ambiante. Elle permet ainsi à la ML2 d'être moins sensible aux lumières vives, permettant alors son utilisation même en extérieur tout en affichant de façon plus claire le contenu virtuel délicat (par exemple du texte). Un point négatif à souligner par rapport au design de la ML2 est que les branches de la lunette bloquent une importante partie du champ visuel périphérique de l'utilisateur.

5.3.1.2 Facilité d'utilisation et mémorabilité

L'utilisation de la ML2 ne nécessite pas une formation préalable, l'interaction avec le contenu virtuel est aisée et intuitive, et ce même pour des personnes n'ayant jamais eu d'expérience avec la réalité augmentée. L'interaction avec l'interface de la lunette se fait par commande vocale, gestuelle ou grâce à une manette fournie avec le casque. L'utilisation de la commande

vocale se base sur des mots clés et ne nécessite pas la rétention parfaite d'une syntaxe précise de mots. Par exemple, l'utilisateur peut baisser le volume d'une vidéo en disant « hey Magic Leap baisse le volume » ou « hey Magic Leap met le volume à 3 ».

Pour la commande gestuelle, le suivi des mains permet aux utilisateurs d'interagir intuitivement avec le contenu numérique en utilisant des gestes naturels de la main et en détectant automatiquement les mouvements des mains d'un utilisateur en temps réel. Ici non plus, il n'est pas nécessaire de retenir un ensemble de gestes prédéfinis pour des commandes. Le système d'exploitation du casque offre deux possibilités d'interactions par commande gestuelle :

- Interaction par champ lointain

Lorsque l'utilisateur active cette option, l'interface d'utilisateur est positionnée à environ 1m de l'utilisateur. Dans ce contexte, les commandes gestuelles se limitent principalement à pointer avec son index pour cibler les boutons de l'interface et de pincer pour en sélectionner.

- Interaction en champ proche

Ici, l'interface d'utilisateur est positionnée à environ 50 cm. Lorsque c'est cette option qui est activée, l'interaction se fait en touchant directement l'interface avec son index ; l'utilisateur glisse sont index sur l'interface pour défiler dans le menu et il sélectionne en piquant avec son index. L'interaction est similaire à celle d'un téléphone intelligent.

Les commandes du ML2 étant totalement naturelles et intuitives, il est donc facile de s'en souvenir même après un long moment passé sans utiliser le casque.

5.3.1.3 Compatibilité avec les logiciels

La ML2 est conçue pour s'intégrer de manière transparente à diverses applications d'entreprise dans divers secteurs d'activités. Avec un système d'exploitation ouvert, elle permet aux entreprises de créer dans Android Studio ou Unity leurs propres applications basées sur

Android. Cette flexibilité offre ainsi aux entreprises la liberté de développer des logiciels internes adaptés à leurs besoins spécifiques, garantissant par là une personnalisation et une compatibilité robuste. Par ailleurs, la ML2 prend en charge les normes logicielles ouvertes telles que OpenGL, Open XR, WebXR et Vulkan. Son hub de gestion externe (Magic Leap hub) indépendant de la plateforme le rend compatible avec les logiciels internes de l'entreprise.

La boutique d'applications de la ML2 disponible au https://www.magicleap.com/apps met également à disposition une panoplie d'applications déjà prêtes pour utilisation pour divers secteurs d'activité.

5.3.2 Microsoft Hololens 2

5.3.2.1 Confort et design

La MH2 présente un design esthétique de casque du type visière rabattable. Le casque est assez volumineux comparé à la ML2. Il est enfilé comme un casque et l'ajustement sur la tête se fait manuellement en serrant l'arceau grâce à une petite bague qui y est installée. L'ajustement de la taille du casque de la MH2 requiert un temps et des mouvements supplémentaires par rapport à celui de la ML2 qui se fait en un seul geste. Le port du casque ne nécessite pas un appui sur l'arête nasale ou sur les oreilles, éliminant ainsi tout risque d'inconfort dû à la pression du casque sur ces parties de la tête. Les 556g du casque sont équitablement répartis entre l'arrière et l'avant, cependant, son poids se fait rapidement ressentir, ce qui limite son utilisation sur une longue période.

Contrairement à la ML2, avec la MH2 il n'est pas nécessaire de retirer complètement le casque de RA pour ne plus avoir l'écran devant ses yeux. La visière s'abaisse et se relève aisément permettant ainsi de sortir facilement de la réalité augmentée quand l'utilisateur n'en a plus besoin sans une interruption de l'exécution de la tâche en cours (l'interruption provient du fait que retirer la lunette nécessite que l'utilisateur aille la ranger convenablement). Un autre point très important par rapport au design de la MH2 est que sa visière est totalement transparente et ne bloque pas la vue périphérique de l'utilisateur. Son écran est très sensible à la lumière : plus

la luminosité de l'environnement est élevée, moins le contenu virtuel est visible, rendant ainsi son utilisation très limitée, voire impossible, en milieu extérieur ou dans les environnements à forte luminosité. L'effet arc-en-ciel présent lors de l'affichage du contenu virtuel et les reflets visibles sur la visière sont d'autres facteurs d'inconfort visuel relevés durant l'utilisation du casque. En effet elles troublent la vue de l'utilisateur, favorisent la fatigue visuelle et réduisent l'expérience et l'immersion de l'utilisateur. La fluidité des objets virtuels présentés par la MH2 est nettement moindre par rapport à la ML2.

5.3.2.2 Facilité d'utilisation et mémorabilité

La MH2 tout comme la ML2 est facile à utiliser, les interactions sont aisées, les commandes vocales ou gestuelles sont naturelles et intuitives, ce qui permet une prise en main rapide. Certaines combinaisons de modes d'interactions sont d'ailleurs intéressantes ; en combinant par exemple le suivi oculaire et la commande vocale, il est possible de fermer une fenêtre ouverte parmi une multitude il suffit de la fixer quelques secondes et de dire ensuite « fermer ». La cartographie qui permet de créer une copie 3D de l'environnement afin d'optimiser l'insertion du contenu virtuel est plus simple et plus rapide avec la MH2 par rapport à la ML2 : avec la MH2, elle se fait automatiquement et de façon continuelle tandis qu'avec la ML2, elle nécessite que l'utilisateur se déplace dans la pièce et se rapproche des objets pour les scanneurs.

L'interface d'accueil est conviviale et rappelle l'interface d'un ordinateur sous Windows. À l'opposé de la ML2 où l'on ne peut ouvrir qu'une application ou une fenêtre à la fois sur la MH2, il est possible d'en ouvrir plusieurs, de les disposer à différents endroits dans l'environnement de travail et de les exploiter simultanément. Néanmoins, l'exécution des applications exigeantes en matière de puissance de calcul demeure de loin plus fluide sur la ML2.

5.3.2.3 Compatibilité avec les logiciels

La MH2 fonctionne sous Windows holographique qui est lui-même basé sur une version de Windows 10 conçu spécifiquement ; de ce fait, le casque est compatible avec la plupart des applications fonctionnant sur Windows10. Par ailleurs, MH2 dispose d'une suite de plateformes telles que Dynamic 365, Microsoft Team, Microsoft Remote Assist qui sont conçues spécifiquement pour les utilisations professionnelles dans divers secteurs d'activité. Tout comme pour la ML2, ici il est également possible pour les entreprises de créer leurs propres applications pour des utilisations beaucoup plus spécifiques avec les outils de développement de Microsoft tels que Unity et Visual Studio.

En résumé, la compatibilité avec les logiciels d'entreprise n'est pas un facteur pouvant limiter l'adoption d'une ML2 ou d'une MH2 en entreprise. Bien que MH2 dispose d'un écosystème de productivité complet, pratique et plus facile à adopter dans les systèmes d'entreprise existants, il s'agit d'un écosystème plus fermé que ML2. Ce dernier en revanche n'a besoin que son hub de gestion externe pour être compatible avec les logiciels d'entreprise externe. Le plus grand avantage que possède la MH2 est le fait qu'elle soit complètement autonome. Elle ne nécessite pas le port d'un équipement supplémentaire, contrairement à la ML2 qui est constituée d'un casque relié à son unité de traitement distincte par un câble. Cette unité de traitement est un module complémentaire extérieur et compact qui se fixe dans un petit sac ou dans la poche de l'utilisateur, laissant ainsi paraitre un câble pendant dans le dos de l'utilisateur. Cependant, il est beaucoup plus confortable d'un point de vue physique et visuel de travailler avec une ML2 qu'avec une MH2. Le rendu visuel du contenu virtuel, la fluidité des interactions avec l'interface sont nettement supérieurs chez la ML2.

Les résultats obtenus au terme de cette étude préliminaire de l'acceptabilité pratique et de l'utilisabilité viennent renforcer ceux obtenus dans l'étude comparative menée avec l'AHP (*Voir* Figure 5.14).

Lors de cette étude comparative, la ML2 et la MH2 se sont démarquées comme étant les deux meilleures lunettes, cependant, la ML2 était largement supérieure à la MH2 sur la quasi-totalité des critères de comparaison. En nous basant sur les résultats de ces deux études, nous identifions la Magic Leap 2 comme équipement d'assistance cognitive la plus adaptée pour le cas d'étude.

5.4 Phase d'évaluation globale

La figure ci-dessous est un extrait du système de travail présenté à la Figure 2.3. Nous avons extrait la partie concernant uniquement le poste d'assemblage et nous l'avons modifié en y incluant les nouveaux équipements et en établissant les nouvelles interactions. Ce système nous servira de base pour la réalisation de l'analyse des risques résiduels du poste de travail.

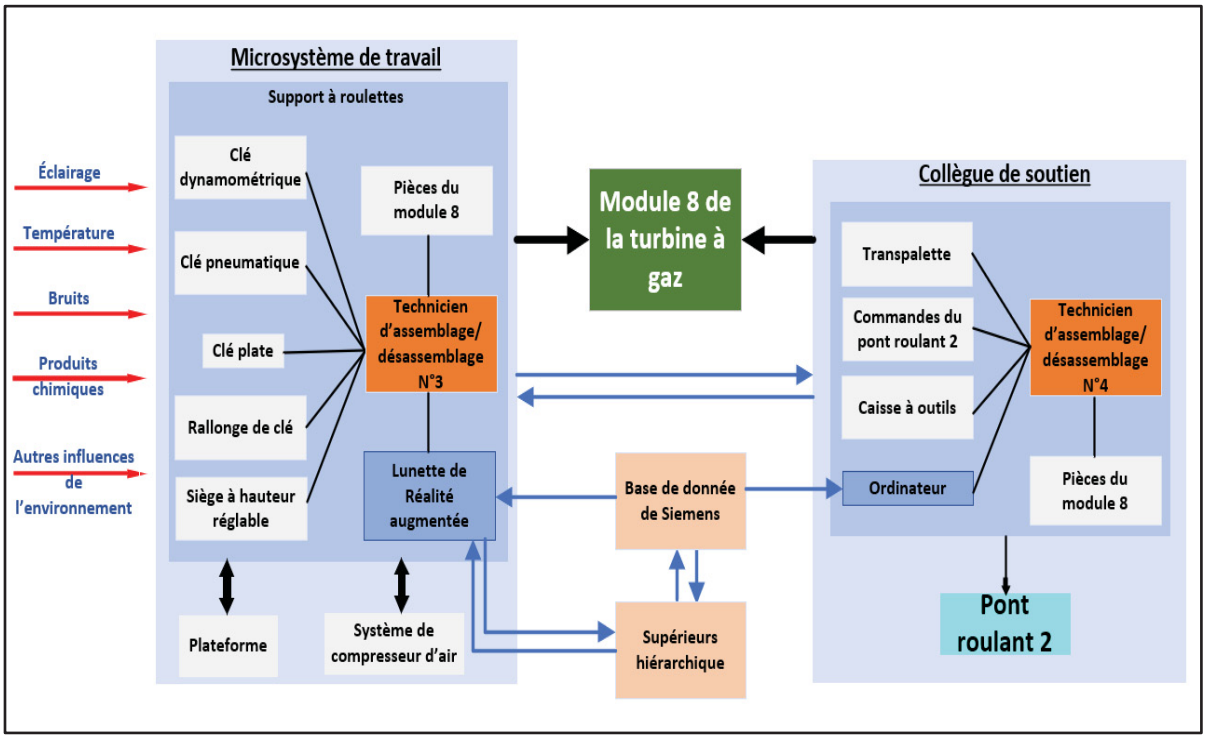


Figure 5.15 Système de travail dans le nouveau poste d'assemblage des étages du module 8 de la turbine

Dès lors, nous avons décomposé les équipements constitutifs du poste de travail en leurs différents composants principaux dans le but de faire ressortir, pour chaque mode de défaillance de ces derniers, les causes possibles, les situations dangereuses, les risques et les dommages qui peuvent en résulter pour les techniciens avec l'outil AMDEC.

Dans cette étude, nous n'avions pas accès à l'historique de maintenance des équipements de la et l'historique des accidents et incidents survenus à ce poste de travail, nous ne pouvions donc pas déterminer les probabilités d'occurrence des évènements dangereux. De ce fait, l'estimation du risque s'est limitée à la détermination de la gravité des dommages. Nous avons réalisé cette tâche à l'aide du guide du processus de l'appréciation du risque (CNESST & IRSST, 2024). Il fournit une appréciation de gravité et une description détaillée pour chaque niveau de gravité (*Voir* ANNEXE VIII, p. 183).

Tableau 5.16 Extrait du tableau AMDEC du nouveau poste d'assemblage des étages du module 8 de la turbine

Equipement	Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système	Conséquence possible sur les techniciens	Dommages possibles	Gravité	Autres risques liés à l'équipement
Siège réglable	Mécanisme de réglage de la hauteur	Permettre au technicien de positionner l'assise à une hauteur lui permettant d'effectuer le boulonnage	Défaillance du mécanisme de réglage de la hauteur	Usure des pièces, défauts de conception, accumulation de saleté, surcharge (masse	Incapacité de l'opérateur de régler la hauteur de l'assise	Inconfort, risque de TMS dûe à une mauvaise posture de travail	TMS (cou, dos, membres supérieurs), stress, blessures	G3	
			Défaillance du mécanisme de verrouillage	Usure des composants, mauvaise maintenance, défauts de fabrication, surcharge	Incapacité de bloquer l'assise à une hauteur autre que la hauteur minimale	Risque de chûte, de se heurter contre les parois internes de la turbine, contre les brides du support à roulettes,	Blessures mineures, ecchymoses	G1	
	Pivot	Assurer le pivotement de l'assise	Blocage	Accumulation de saleté	Perte de la fonction	Risque de se heurter la tête ou le dos en repositionnant la chaise dans une nouvelle direction, adoption de posture non neutre (torsion du buste)	Blessures mineures, ecchymoses, développement à la longue des TMS liés au dos	G3	
	Roulettes	Faciliter le déplacement de la chaise dans le poste de travail	Défaillance structurelle (déformation, fissure, rupture)	Mauvaise qualité des matériaux, défauts de fabrication, surcharge	Instabilité de la chaise, diminution de la capacité de roulement	Perte d'équilibre	Blessures mineures, ecchymoses	G1	
Flexible air		Transporter l'air comprimé de la station de compression au cliquet pneumatique	Obturation	Impuretés contenus dans l'air	Difficulté voire impossibilité de serrer les boulons	Frustration			
			Fuite	Mauvais serrage du raccordement, usure	Baisse de la pression d'air et donc du couple généré par la clé	Frustration, fatigue			
Cliquet pneumatique		Faciliter et accéler le serrage des boulons	Fuite d'air	Usure des joints, mauvais entretien, dommage des composants internes	Perte de la puissance de serrage, augmentation de la consommation d'air, perte de l'efficacité	Frustration, fatigue			
			Fonctionnement intempestif (Usure des composants internes)	Utilisation intensive, mauvaise qualité des pièces, absence d'entretien régulier	Réduction de la puissance de serrage	Exposition au bruit et aux vibrations acrues de l'outil	Engourdissement, syndrome vibratoire	G3	
			Blocage	Défaillance de la gachette, mauvaise conception	Mise en marche difficile ou impossible de l'outil	Frustration, augmentation de la force nécessaire pour actionner l'outil	Lésion musculosquelettique possible	G2	

Equipement	Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système	Conséquence possible sur les techniciens	Dommages possibles	Gravité	Autres risques liés à l'équipement
Pont roulant	Moteurs électriques de direction et de translation du pont roulant	Assurer les déplacements du pont sur les voies de roulement	Non démarrage	Défauts primaires, secondaires ou defaut de commande	Translations du pont roulant impossibles	Frustration			Un mauvais élingage ou fixation de la charge est également à l'origine des chutes de charge pouvant causer la mort par écrasement
			Arrêt intempestif	Défauts primaires, secondaires ou defaut de commande (erreur humaine)	Perte de la fonction de translation du pont roulant	Frustration			
			Pas d'arrêt	Défaut de commande, erreur humaine	Collision avec la structure portante, fragilisation du chasis ou de la structure	Écrasement par la charge	Décès, fractures multiples, blessures multiples	G4	
			Démarrage intempestif	Erreur humaine, défaillance des composants électroniques	Dommages matériel (pièces transportées ou turbine)	Risque d'écrasement ou de collision pour les techniciens aux alentours	Décès, fracture, ecchymose	G4	
	Moteur électrique de montée/descente	Assurer la montée/descente	Non démarrage	Défauts primaires, secondaires ou defaut de commande	montée et descente du pont roulant impossibles	Frustration			
			Arrêt intempestif	Défauts primaires, secondaires ou defaut de commande (erreur humaine)	Perte de la fonction de montée/descente	Frustration			
			Pas d'arrêt	Défaut de commande, erreur humaine	Collision avec le chassis ou avec les équipements au sol: fragilisation du chasis, bris de la turbine	Écrasement, coincement par la charge, chocs	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
			Démarrage intempestif	Erreur humaine	Endommagement de matériel (pièces de la turbine)	Écrasement, coincement par la charge, chocs	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
	Accouplement moteur-réducteur (montée/descente)	Effectue la liaison entre le moteur du tambour et le réducteur	Rupture de la partie élastique	Usure	Perte de l'élasticité de l'accouplement				
			Rupure totale	Défauts primaires, usure, désalignement des arbres	Descente de la charge	Écrasement, coincement par la charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
	Réducteur (moteur tambour)	Entraine le tambour en rotation en réduisant la vitesse augmentant la puissance	Blocage	Défauts primaires, absence de graissage	Perte de la fonction de levage	Frustration			
			Détérioration, rupture des engrenages	Mauvais ou absence de graissage, vibrations, usure des roulement, présence d'impuretés dans la graisse	Vibrations accrues, élévation de la température dans le réducteur, perte de la fonction de levage	Exposition aux bruits			
	Frein	Freiner tambour / galets	Freinage intempestif	Usure des garnitures, défaut de commande	Perte de la fonction de levage	Exposition aux bruits, risque de se faire heurter ou coincer par la charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
			Absence de freinage	Défauts primaires, secondaires, de commande	Perte de la fonction de levage	Exposition aux bruits, risque de se faire heurter ou coincer par la charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	

Equipement	Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système	Conséquence possible sur les techniciens	Dommages possibles	Gravité	Autres risques liés à l'équipement
Pont roulant	Frein	Freiner tambour / galets	Freinage intempestif	Usure des garnitures, défaut de commande	Perte de la fonction de levage	Exposition aux bruits, risque de se faire heurter ou coincer par la charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
			Absence de freinage	Défauts primaires, secondaires, de commande	Perte de la fonction de levage	Exposition aux bruits, risque de se faire heurter ou coincer par la charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
	Tambour	Enrouler et dérouler le câble de levage pour faire monter ou descendre la charge	Défaillance structurelle (rupture, déformation)	Défaut de fabrication, charges excéssives, conditions de fonctionnement extrêmes	Perte de la fonction de levage par pertubation du bon enroulement du câble ou par défaillance totale du tambour	Écrasement par La charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
			Usure excessive	Utilisation intensive, entretien insuffisant, chages excéssives	Réduction de la capacité de charge du tambour, problèmes d'enroulement du cable, defaillance structurelle	Écrasement par La charge	Décès, fracture, blessures multiples, ecchymose	G4	
	Câble	Transmission de la force de levage et support de la charge	Défaillance structurelle (rupture, fissuration, déformation)	Surcharge,usure, fatigue due a des cycles répétés de chage et de décharge, mauvaise répartition de la charge	Perte total de la fonction	Écrasement par La charge	Décès, fracture, blessures multiples et graves	G4	
			Corrosion	Manque d'entretien, exposition à l'humidité	Affaiblissement de la résistance du cable à la traction, risque de rupture	Écrasement par La charge	Décès, fracture, blessures multiples et graves	G4	
			Défaillance du système de fixation	Usure, mauvaise fixation, corrosion	Risque de détachement du cable	Écrasement par La charge	Décès, fracture, blessures multiples et graves	G4	
	Galets	Assurer le déplacement du pont sur les voies de roulement	Blocage	Usure,mauvais ou manque de graissage, défaut d'alignement des rails, accumulation de débris	Ralentissement ou interruption des opérations	Risque de choc avec la charge déplacée, frustration	Fracture, ecchymose	G3	
			Usure	Utilisation prolongée, mauvaise conception (choix des matériaux), charges excéssives	Déplacements du pont difficiles ou impossibles, augmentation du frottement et de la consommation en énergie	Frustration			
			Déformation structurelle	Chocs repétés, surcharge	Instabilité du pont lors des déplacements, risque de dommages matériel	Écrasement par La charge, risque de choc avec la charge déplacée	Décès, fracture, blessures multiples et graves	G4	

Equipement	Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets sur le système	Conséquence possible sur les techniciens	Dommages possibles	Gravité	Autres risques liés à l'équipement
Transpalette électrique	Moteur électrique	Fournir la puissance nécessaire pour le déplacement	Démarrage intempestif	Erreur humaine, problèmes électriques	Dommages matériel	Risque de collision pour les techniciens aux alentours, écrasement, cisaillement ou pincement des pieds, des mains ou toute autre partie du corps en contact	Blessures, fractures, doigts, mains, pieds écrasés	G3	
			Pas d'arrêt	Défauts primaires, problèmes électriques, défaut de commande usure des composants internes, défaut du système de freinage	Dommages matériel	Risque de collision pour les techniciens aux alentours, écrasement, cisaillement ou pincement des pieds, des mains ou toute autre partie du corps en contact	Blessures, fractures, doigts, mains, pieds écrasés	G3	
	Timon à poignée	Permet à l'utilisateur diriger le transpalette durant les déplacements	Blocage mécanique	Usure normale des piéces mobiles,mauvaise utilisation, mauvaise ou manque de lubrification, pièces internes endommagées	Perte de la fonction, perte ou difficulté de contrôle du transpalette	Risque d'accidents pour l'utilisateur et les personnes aux alentours (renversement des charge), chocs, écasement, cisaillement	Blessures, fractures, doigts, mains, pieds écrasés	G3	
					Arret d'utilisation	Frustration, stress, diminution de la productivité			
	Commandes	Actionner le levage et la descente des fourches	Blocage mécanique	usure normale, utilisation excessive, maintenance inadéquate, pièces internes endommagées	Perte de contrôle des fourches, risque d'endommagement des pièces transportées	Risque d'accidents pour l'utilisateur et les personnes aux alentours (renversement des charge)			
			Défaillance électrique (court-circuit,défaillance des composants électronique, interruption de câble)	Surtension, surcharge électrique, problèmes liés à la batterie, problème de câblage	Immobilisation du transpalette	Frustration, augmentation de la charge cognitive, diminution de la productivité			
	Batterie	Alimenter le transpalette en énergie électrique	Décharge rapide	Mauvaise charge, utilisation excésive, vieillissement de la batterie	Temps de fonctionnement réduit, nécéssités de recharges plus fréquentes				
			Court-circuit	Problème de câblage, corrosion des connexion	Immobilisation du transpalette	Exposition à un risque d'incendie ou d'explosion, frustration, augmentation de la charge cognitive, diminution de la productivité	Brûlures, blessures multiples, décès	G4	
			Surchauffe	Défauts de fabrication, surcharge	Réduction de l'autonomie, manque de puissance de levage				
	Système de levage et de descente des fourches	Permettre de soulever les charges	Pompe défectueuse	Usure des composants, défauts primaires, défaut de lubrification	Incapacité à soulever les charges, arrêt des opérations	Frustration, stress, diminution de la productivité	Brûlures, blessures multiples, décès	G4	
			Fuite hydraulique	Connexions hydauliques et raccords endommagé ou désserrés, flexibles	Perte ou dimunition de la puissance de levage	Risque d'accidents causés par la chute de la charge ou par l'huile déversée sur le plancher , frustration			
	Roues	Permettent le déplacement du transpalette	Usure	Utilisation régulière, intensive ou prolongée	Perte d'adhérence, perte de contrôle du transpalette, déplacement et manoeuvrage rendu difficile				
			Déformation	Surcharge, choc important	Difficulté de déplacement, instabilité du transpalette	Exposition des vibrations excéssives	Syndrome vibratoire	G2	
			Endommagement des roulements	Défaut de lubrification, mauvais entretien, présence de particules étrangères dans	Roulement irrégulier ou immobilisation du transpalette	Exposition au bruits et aux vibrations	Syndrome vibratoire	G2	

Nous avons réalisé cet AMDEC en nous basant sur des fiches produites par des associations sectorielles paritaires notamment :

- Pour l'équipement pneumatique et les flexibles, APSAM fournit une fiche technique disponible à travers le lien : https://d12oqns8b3bfa8.cloudfront.net/apsam/publications/ft75.pdf?v=1679459752
- Pour le pont roulant, MULTI PRÉVENTION fournit un guide d'identification des composants de l'équipement, les types et les sources d'accidents. Ce guide est disponible à travers le lien : https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2015/11/multiprevention-guide-greage.pdf.

Pour la réduction des risques identifiés à travers l'AMDEC :

- L'association sectorielle paritaire MULTI PRÉVENTION fournit une fiche d'inspection générique des transpalettes électriques (disponible à travers le lien https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2015/11/multiprevention-fiche-inspection-transpalette.pdf).
- Elle fournit également une grille et un guide d'inspection au début de chaque quart de travail pour les ponts roulants avec commande au sol (disponible à travers le lien https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2015/11/multiprevention-guide-greage.pdf)

Ces fiches contiennent des informations génériques des équipements et donc une étude plus approfondie et plus spécifique doit être réalisée pour être parfaitement en accord avec les équipements présents chez le partenaire industriel.

L'AMDEC réalisé met en évidence que les risques les plus graves sont associés à l'utilisation du pont roulant présent dans le poste de travail. Il est donc nécessaire d'implémenter des actions préventives telles que la mise à jour des procédures de sécurité, des formations régulières pour les opérateurs, un contrôle rigoureux de l'entretien du matériel, et l'installation

de dispositifs de sécurité supplémentaires pour minimiser ces risques et garantir la sécurité des travailleurs.

CHAPITRE 6

DISCUSSION

L'objectif de ce chapitre est de discuter de la validité du protocole de recherche, de la validité des résultats de l'étude et des forces et faiblesses de l'approche proposée. Il présente par ailleurs les recommandations et les pistes de développements futurs de ces travaux de recherche.

6.1 Comparaison avec les approches de sélection systématique relevées dans la littérature

6.1.1 Comparaison avec l'approche de Mark et al. (2022)

L'approche établie par Mark et son équipe permet de sélectionner et de classer par ordre de priorité les types d'équipement d'assistance les mieux adaptés pour un poste de travail précis dans lequel un travailleur ou un groupe de travailleurs exécutent une ou des tâches précises. Contrairement à notre approche, celle de Mark et al. (2022) n'accompagne pas le concepteur jusqu'à la sélection précise d'un équipement d'assistance issu du groupe ou du type d'équipement d'assistance préconisé. Au vu de la multitude d'équipements d'assistance existants sur le marché pour chaque type d'équipement d'assistance, nous considérons qu'il serait avantageux de mettre à la disposition du concepteur des lignes directrices ou des indications précises lui permettant de choisir un équipement de façon spécifique dans un type ou un groupe d'équipement d'assistance.

En effet, l'approche de sélection systématique de Mark et al. (2022) peut par exemple se terminer en préconisant de choisir un visiocasque comme équipement d'assistance sans plus. Notre approche en revanche va plus loin en permettant au concepteur de choisir le visiocasque le plus approprié pour son cas d'étude en se basant sur un ensemble de critères qui influent sur

l'acceptabilité et l'utilisabilité des visiocasques et sur les performances et l'ergonomie des travailleurs.

6.1.2 Comparaison avec l'approche de Syberfeldt et al. (2017)

L'approche de Syberfeldt et al. (2017), comme la nôtre, guide le concepteur pour le choix d'un équipement spécifique et plus précisément pour le choix d'un visiocasque. Cependant, cette approche possède des limites non négligeables. Comme présenté à la section 1.2.2, ces limites sont liées à l'ordonnancement des critères de sélection et l'utilisation des seuils d'acceptabilité qui conduisent à l'élimination directe de certains visiocasques prometteurs. Cette démarche ne tient pas compte de l'influence que peuvent avoir certains critères sur d'autres. Notre démarche en revanche ne se comporte pas comme un tamis à plusieurs étages destiné à éliminer des visiocasques à chaque étage correspondant à chaque critère de sélection. La démarche que nous proposons considère tous les critères de sélection ensemble et confère un poids d'importance à chacun de ces derniers. Elle met un point d'honneur à l'ergonomie physique, visuelle et cognitive des travailleurs sans pour autant minimiser les performances techniques des visiocasques.

6.2 Biais et limites de la méthodologie adoptée

6.2.1 Validité interne et externe

6.2.1.1 Validité interne

La méthodologie de recherche que nous avons adoptée est une recherche en conception, menée avec un partenaire industriel précis, dont les situations de travail lui sont propres. Selon Jogulu et Pansiri (2011), l'utilisation de la triangulation dans la cueillette, le traitement et l'analyse de données dans une recherche de type qualitative permettent d'assurer la validité interne. Au cours de la réalisation de cette étude, nous avons assuré la triangulation lors de la cueillette de données en faisant recours à trois sources de données à savoir :

- La littérature scientifique;
- Les données inertes directement recueillies sur le terrain et les simulations en laboratoire;
- Les entrevues avec le comité de suivi du projet du partenaire industriel.

Les données inertes collectées sur le terrain sont essentiellement quantitatives et représentent les dimensions du poste de travail et de ses éléments, la masse et les dimensions de chacun des outils manuels. Les instruments de mesure utilisés (pied à coulisse, balance et mètre ruban) étaient ceux fournis par le laboratoire du Génie des Facteurs humains Appliqué. Les mesures effectuées ont été vérifiées à l'aide des instruments de mesure du partenaire industriel dont la fiabilité et la conformité sont garanties par le service d'instrumentation qui veille régulièrement à leur calibration.

En ce qui concerne le traitement et l'analyse des données, nous n'avons pas pu mener une triangulation. En effet, nous nous sommes basés sur la littérature scientifique ainsi que des simulations et évaluations via deux logiciels de DHM (Digital Humain Modeling) à savoir Catia V5 et PLM Jack 7.1. Compte tenu du fait que nous ne détenions pas un certificat d'éthique durant la réalisation de notre projet de recherche, de ce fait nous n'avions pas la possibilité d'impliquer des participants humains pour réaliser l'étude de l'utilisabilité ou pour l'observation et l'enregistrement des postures et méthodes de travail réel.

Par ailleurs, l'étude réalisée étant une étude de cas, et par définition, l'une de ses plus grandes forces est d'assurer la forte validité interne (Gagnon, 2012).

6.2.1.2 Validité externe

La méthodologie que nous avons proposée a été établie pour répondre aux besoins spécifiques du partenaire industriel et a de ce fait été influencée par ses besoins. Particulièrement, la mise en place de la phase de l'ergonomie cognitive liée à la sélection d'un équipement d'assistance a été guidée par le système de travail présent chez le partenaire : plus précisément, les contraintes liées au poste de travail et à la tâche ont mené à une précision des étapes de cette phase de la méthodologie et non à une généralisation. De ce fait, la capacité à exploiter nos résultats dans des contextes différents repose essentiellement sur la similitude des situations de travail avec celle de notre partenaire industriel : assemblage complexe - espace restreint - poste de travail mobile. Dès lors que les situations de travail diffèrent de celle de notre partenaire, la mise en œuvre de la méthodologie pourrait exiger aux concepteurs de redéfinir les critères de comparaison et leur différent poids de priorisation lors de la mise en place de l'AHP.

En somme, nous ne pouvons pas assurer la validité externe de nos résultats. Par contre, la réalisation de multiples études de cas pourrait confirmer ou infirmer une possible généralisation de l'approche que nous proposons (Gagnon, 2012).

6.2.2 Limites de l'étude

L'objectif de cette étude était de mettre sur pied une méthodologie de conception d'équipement mécano numérique en milieu de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint. En d'autres termes, nous devions concevoir une approche qui positionne le travailleur au centre de la conception ou de la reconception d'un poste de travail impliquant l'utilisation d'un outil mécanique et d'un équipement d'assistance cognitive. La méthodologie que nous avons proposée est une approche qui se déroule en trois phases : la phase d'ergonomie physique, la phase d'ergonomie cognitive et la phase de l'évaluation des risques.

La phase d'ergonomie cognitive est celle qui présente la principale limite de notre approche. En effet, dans cette phase, le passage de l'étape de la sélection du système d'assistance à l'étape de la comparaison multicritère limite l'utilisation de notre approche aux cas où l'équipement d'assistance adéquat est un visiocasque. Dans des cas d'étude différents où la prise en considération de la situation de travail du cas étudié (contraintes liées au poste de travail, à la tâche et au travailleur) mène à la sélection préliminaire d'un type d'équipement d'assistance autre que les visiocasques, les étapes suivantes de la phase d'ergonomie cognitive devront être modifiées. En effet il faudra dès lors redéfinir de nouveaux critères de comparaison, redéfinir les ordres de priorisations de ces derniers et redéfinir les critères de l'évaluation de l'acceptabilité pratique de l'équipement d'assistance.

Par ailleurs, ce projet a été initié dans un contexte où la situation liée au COVID-19 était préoccupante, ce qui a conduit le partenaire industriel à refuser une étude impliquant des participants humains. En conséquence, l'une des limites de notre étude réside dans l'absence de l'implication de participants humains. Cette contrainte nous a conduit à effectuer les analyses ergonomiques sur des postures de travail réalistes plutôt que sur celles réellement adoptées par les travailleurs lors de l'exécution des boulonnages. De plus, l'impossibilité d'inclure des participants humains dans notre étude nous a également mener à utiliser la méthode de l'AHP sans l'intervention d'un comité chargé de l'établissement des priorités relatives durant les comparaisons multicritères des visiocasques

CONCLUSION

Le but de cette étude était de proposer une démarche de conception d'équipement mécano numérique pour un poste de travail dans un contexte d'assemblage complexe en espace restreint. Une démarche positionnant le travailleur au centre de la conception et mettant l'accent sur l'aspect ergonomique afin de minimiser les risques de SST liés au système de travail. Pour la réalisation de cette étude, nous avons adopté la méthodologie de recherche en conception présentée au CHAPITRE 2. Cette méthode nous a poussés à réaliser tout d'abord une revue de littérature au CHAPITRE 1 afin d'aiguiser nos connaissances sur les thématiques pertinentes en relation avec notre sujet de recherche et d'orienter notre étude.

Le CHAPITRE 2 nous a permis de contextualiser notre étude et de faire ressortir les problèmes spécifiques auxquels notre démarche combinant l'ergonomie physique et l'ergonomie cognitive permettait d'apporter des solutions. Ces problèmes étaient principalement liés à l'exigüité de l'espace de travail et au besoin d'un support cognitif. Aux CHAPITRE 3, 4 et 5, nous avons présenté les résultats de notre étude. Particulièrement, au CHAPITRE 3, nous avons détaillé les différentes étapes de notre démarche et les CHAPITRE 4 et 5 ont permis la validation de la démarche par une application dans un cas d'étude réaliste. Ce faisant, notre démarche a permis de: 1) améliorer significativement l'ergonomie dans le poste d'assemblage du module 8 de la turbine à gaz du partenaire industriel et donc réduire les risques de troubles musculosquelettiques; 2) réduire les risques de blessures par choc avec les parois internes de la turbine; 3) faire un choix optimal de l'équipement d'assistance adéquat pour le poste d'assemblage. Finalement, le CHAPITRE 6 a présenté une discussion portant sur la comparaison de notre démarche avec celles relevées dans la littérature et démontré son côté innovateur. Il a également abordé les biais et les limites de notre étude ainsi que de la démarche que nous avons proposée.

La démarche mise sur pied dans cette étude répond à la question de recherche « quelle serait la démarche appropriée, pour une conception combinant un outil mécanique et numérique pour

l’amélioration ergonomique d’un poste de travail dans un contexte d’assemblage complexe en espace restreint ? »

En somme, les résultats découlant dans cette étude ont été obtenus sous étude de cas, de ce fait, une généralisation de ces dernières pourrait être établie uniquement à la suite de multiples études de cas.

RECOMMANDATIONS

L'étude réalisée par Khoddammhoammadi, Ngô, et Nadeau (2023b) montre que la sélection et l'intégration d'un visiocasque adéquat dans un système de travail ne suffisent pas à garantir l'amélioration des performances des travailleurs. En effet, la façon dont les informations sous forme d'instructions de travail sont acheminées au travailleur a une importance capitale et une influence certaine sur l'utilisabilité de la lunette. L'approche que nous avons proposée aborde la question de l'évaluation de l'utilisabilité des lunettes, mais ne donne pas des lignes directrices sur la façon de concevoir l'interface virtuelle de la lunette ou la façon d'acheminer et de présenter les informations aux travailleurs.

Il serait intéressant pour des travaux futurs d'approfondir l'aspect de la conception des interfaces des visiocasques et l'acheminement des informations afin d'améliorer l'utilisabilité de ces dernières et favoriser leur adoption.

ANNEXE I

LISTE DE PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIÉES AU PROJET

Tableau-A I-1 Liste de productions scientifiques associées au projet

En rédaction	Article de revue avec comité de pairs
Romuald Valdesse Eko'ola, Sylvie Nadeau, Kurt Landau. 2024 « Vers une démarche d'aide au choix d'une technologie d'assistance visuelle ». Communication lors de la conférence : 44e congrès de l'AQHSST : Fragilisation de la prévention au travail dans un contexte de pénurie : Défis et solutions (Valleyfield, QC, Canada, 22-24 mai 2024)	Article de conférence scientifique avec comité de pairs
2023 Eko'ola, R. V., Landau, K., & Nadeau, S.. *Conception d'un support visuel à l'assemblage / désassemblage des turbines à gaz : Rapport de recherche confidentiel stage 1 destiné au partenaire industriel*. École de Technologie Supérieure – partenaire industriel. 62 pages. Financement (Mitacs, CRSNG, ETS).	Rapport de recherche confidentiel du premier stage
2023 Eko'ola, R. V., Landau, K., & Nadeau, S. *Conception d'un support visuel à l'assemblage / désassemblage des turbines à gaz : Rapport de recherche confidentiel stage 2 destiné au partenaire industriel*. École de Technologie Supérieure – partenaire industriel. 93 pages. Financement (Mitacs, CRSNG, ETS).	Rapport de recherche confidentiel du deuxième stage
2024 Eko'ola, R. V., Landau, K., Nadeau, S. *Conception d'un support visuel à l'assemblage/désassemblage de turbines à gaz : Partie 3. Rapport de recherche confidentiel stage 3 destiné au partenaire industriel*. École de Technologie Supérieure – partenaire industriel. 89 pages. Financement (Mitacs, CRSNG, ETS).	Rapport de recherche confidentiel du troisième stage

ANNEXE II

RÉSUMÉ ET PRÉSENTATION AQHSST

RÉSUMÉ

Les technologies de la réalité virtuelle, réalité augmentée et de la réalité mixte se développent de plus en plus et trouvent des applications dans des domaines divers tels que l'éducation, la santé, la manufacture, etc. Le secteur de la construction aéronautique en particulier est un secteur hautement normé dans lequel les techniciens doivent retenir une grande quantité d'informations pour l'exécution de leurs tâches d'assemblage, de maintenance et d'inspection des pièces mécaniques. À cet effet, de nombreux systèmes d'assistance basés sur la réalité augmentée ou mixte ont été développés afin d'apporter un support visuel au travailleur en fournissant la bonne information au bon moment.

L'objectif de cette étude est de développer une démarche d'aide au choix de la technologie la plus adaptée à apporter un support visuel à un travailleur dans un espace de travail restreint et par la suite, de proposer un modèle multicritère pour la sélection d'une lunette intelligente.

À cet effet, une revue a couvert la littérature principalement anglaise de 2014 à 2023 disponible dans les bases de données Compendex 1884, Google Scholar, Inspect 1969 et l'effet boule de neige a également été utilisé. Ensuite, un tri préliminaire des technologies a été réalisé à partir de la taxonomie des systèmes d'assistance de Pokorni et Constantinescu (2021) , des contraintes liées au poste de travail et aux tâches nécessitant l'assistance. Pour finir, un modèle de sélection multicritère a été appliqué sur un ensemble de 8 lunettes intelligentes afin d'éliminer au fur et à mesure celles qui ne satisfaisaient pas aux critères.

Les résultats de cette étude montrent que dans un espace de travail restreint, les lunettes de réalité augmentée ou mixte sont la technologie la plus appropriée pour soutenir le travailleur dans les tâches d'assemblage et désassemblage. En outre, la Magic Leap 2 et la Microsoft Hololens 2 sont les lunettes qui ont été retenues au sortir du modèle de sélection multicritère. Il sera question par la suite de procéder à une étude de l'utilisabilité pratique de ces deux lunettes afin de n'en retenir qu'une seule.

Mots clés : Systèmes d'assistance, industrie 5.0, lunettes intelligentes, ergonomie cognitive, assemblage, critères de sélections, champ visuel, masse.

PRÉSENTATION AQHSST

THEME :

VERS UNE DEMARCHE D'AIDE AU CHOIX D'UNE TECHNOLOGIE D'ASSISTANCE VISUELLE

Présenté par

Romuald Valdesse EKO'OLA

Sous la supervision de

Directrice : Sylvie NADEAU, ing., Ph.D.

Co-Directeur : Kurt LANDAU, Prof., Ing., Ph.D.

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

METHODOLOGIE

RESULTATS

CONCLUSION

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

1

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Le contexte actuel du secteur manufacturier et en particulier le secteur de la construction aéronautique est caractérisé par:

- Secteur hautement normé
- Complexité croissante des produits
- Pénurie de la main d'œuvre qualifiée

Un choix optimal et une implémentation réussie d'un équipement d'assistance

- Acquisition accélérée du savoir-faire
- Amélioration de la productivité et la sécurité
- Réduction non négligeable du taux d'erreurs

Definition

Outil permettant de soutenir ou de rehausser les capacités ou les compétences d'un travailleur par la transmission d'informations, l'assistance perceptuelle de l'information et le support à la décision (Nadeau, 2019).

Objectif

Démarche d'aide au choix

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

2

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

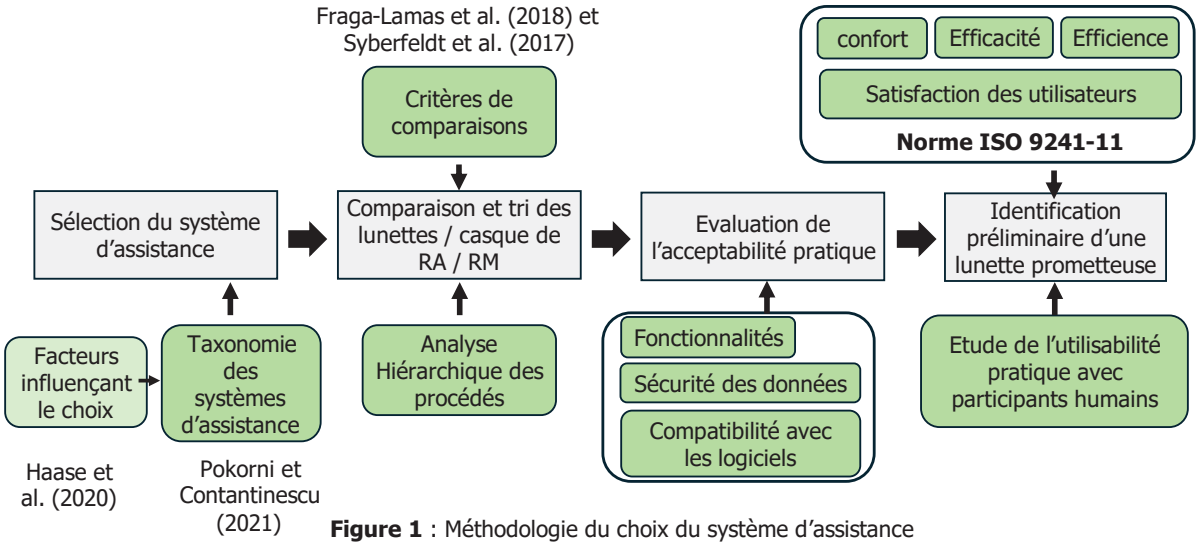


Figure 1 : Méthodologie du choix du système d'assistance

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

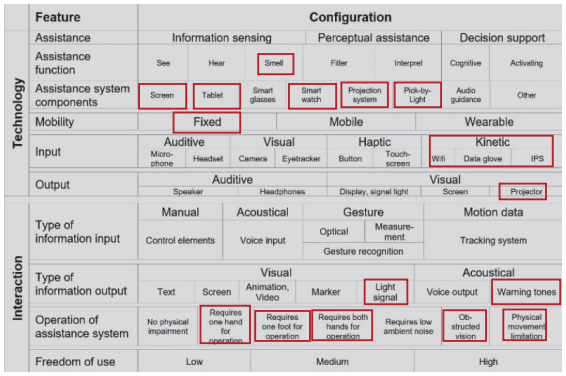


Figure 2 : Extrait de la taxonomie des systèmes d'assistance tiré de Bastian Pokorni et Carmen Constantinescu (2021, P.1780)

Tableau 1 : Tri préliminaire des systèmes d'assistance

Technologie	Décision	Raison
Réalité virtuelle	À exclure	Principalement utilisée pour la formation, pas adaptée au travail sur le terrain
Pick-by-light		Le poste d'assemblage n'est pas fixe et difficulté de réalisation car espace de travail restreint
Écran fixe, moniteur		Pas adapté pour des travaux nécessitant que les deux mains soient occupées.
Tablette		
Montre intelligente		
Système de projection		Poste de travail pas adapté, espace restreint, surfaces cylindriques
Technologie de réalité augmentée et de réalité mixte	Prometteur	Permet une interaction avec des éléments virtuels dans l'environnement réel, adaptée pour l'apprentissage intégré au travail
Lunettes / casque de réalité augmentée ou mixte		N'entrave pas les mouvements des mains; Mobile et portable

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Critères retenus pour la comparaison des lunettes / casque de RA / RM

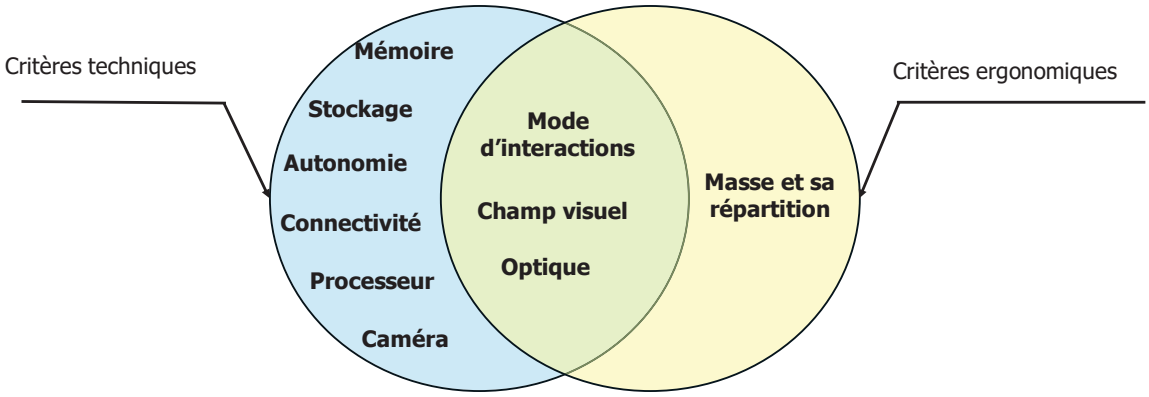


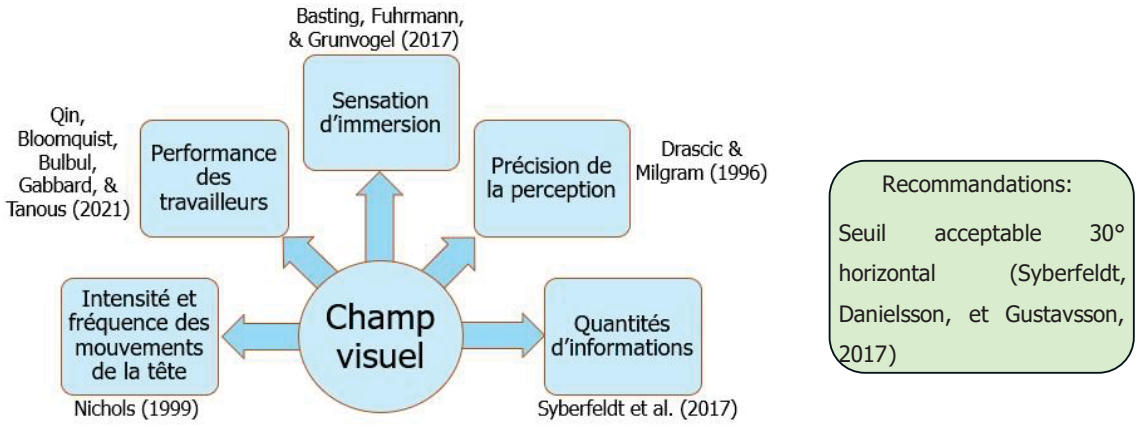
Figure 3 : Critères de comparaison tirés de Fraga-Lamas et al. (2018) et Syberfeldt et al. (2017)

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Champ visuel

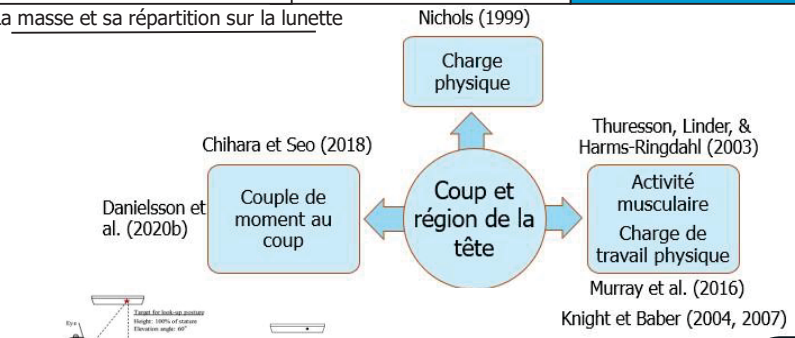
Zone dans laquelle les images générées par le casque sont superposées au champ de vision naturel de l'utilisateur (Syberfeldt et al., 2017).



Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

La masse et sa répartition sur la lunette



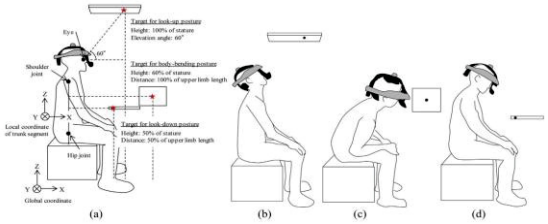


Figure 4 : Postures d'observation avec casque de réalité augmentée : a) posture neutre; b) posture de regard vers le haut; c) posture de flexion du corps; d) posture de regard vers le bas. Tiré de (Chihara et Seo, 2018)

Recommandations:

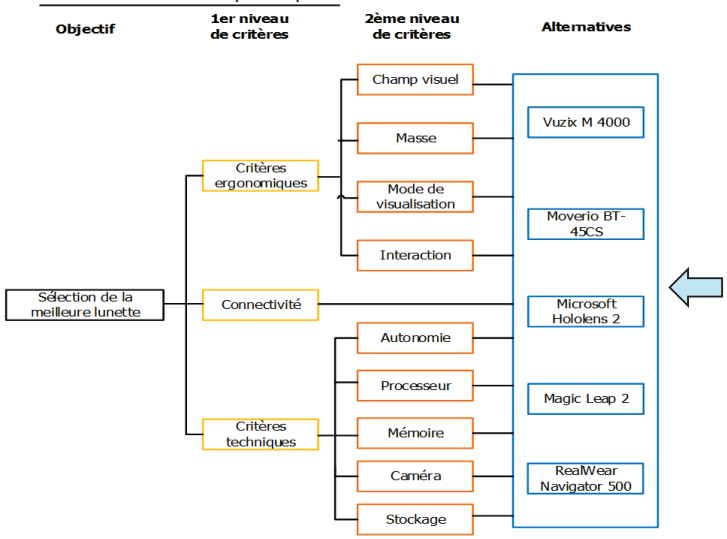
- Lunette dont la masse n'excède pas 100g (Syberfeldt, Danielsson, et Gustavsson, 2017)
- Lunette aussi légère que possible (Chihara & Seo, 2018)

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Mise en œuvre de l'AHP

Structuration hiérarchique du problème



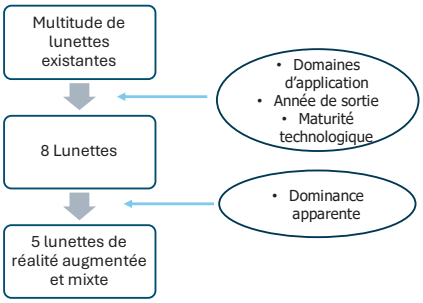


Figure 5 : Hiérarchisation du choix de la meilleure lunette

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Établissement des priorités relatives des critères

- Impact direct et important des critères ergonomiques sur les travailleurs (inconfort, contraintes physiques, fatigue musculaire et visuelle)
- Impact direct des critères techniques sur la performance de la lunette
- La connectivité conditionne l'intégration de la lunette et son comportement dans un système connecté

Échelle numérique	Échelle verbale
1.0	Importance égale des deux éléments
3.0	Un élément est un peu plus important que l'autre
5.0	Un élément est plus important que l'autre
7.0	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9.0	Un élément est absolument plus important que l'autre
2.0, 4.0, 6.0, 8.0	Valeurs intermédiaires entre deux jugements, utilisés pour affiner le jugement

Figure 6 : Échelle de Saaty tirée de Saaty (2008)

Tableau 2 : Matrice de comparaison des critères du 1er niveau hiérarchique

Critères	Critères ergonomiques	Connectivité	Critères techniques
Critères ergonomiques	1,00	8,00	5,00
Connectivité	0,13	1,00	0,33
Critères techniques	0,20	3,00	1,00

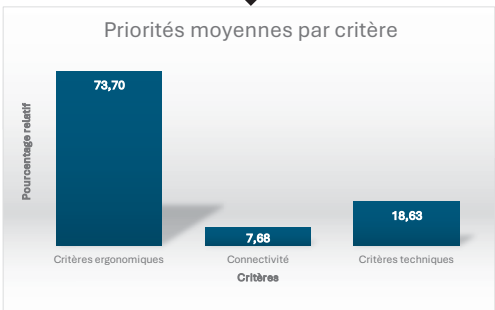


Figure 7 : Poids des Critères du 1er niveau hiérarchique

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Établissement des priorités relatives des sous critères ergonomiques

- Le champ visuel influence la posture de travail (Chihara & Seo, 2018), la fréquence et l'intensité des mouvements de la tête et du cou (Nichols, 1999); De plus un champ visuel étroit (20 degrés horizontal) rend la lunette inutilisable (Syberfeldt et al., 2017).
- L'expérience de l'utilisateur et l'efficacité de la lunette sont affectées par la résolution d'affichage(Nichols, 1999)
- Prioriser le champ visuel et le mode de visualisation par rapport à la masse (Nichols, 1999)
- La masse est fixe et exerce continuellement les mêmes contraintes physiques sur le travailleur (Chihara et Seo, 2018), les interactions offrent plus de flexibilité pour pallier aux effets négatifs qu'elles peuvent causer

Tableau 3 : Matrice de comparaison des sous critères ergonomiques

Sous-critères	Champ visuel	Masse	Mode de visualisation	Interaction
Champ visuel	1,00	7,00	3,00	8,00
Masse	0,14	1,00	0,20	3,00
Mode de visualisation	0,33	5,00	1,00	7,00
Interaction	0,13	0,33	0,14	1,00

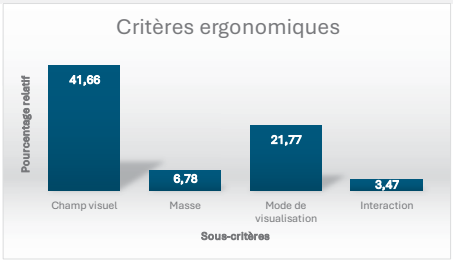


Figure 8 : Poids des sous critères ergonomiques

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau, École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

Établissement des priorités relatives des sous critères ergonomiques

- La puissance du processeur et de la mémoire sont liés à la vitesse d'exécution des processus, de traitement de données, le délai de réponse de l'interface virtuel, la performance des travailleurs dans les tâches collaboratives avec la lunette.
- L'autonomie et le troisième critère le plus important du fait que la lunette doit minimiser les interruptions de travail pour cause de recharge de batterie, elle impacte l'efficacité de la lunette.
- La caméra est nécessaire pour rendre possible la téléassistance et la documentation des rapports de travail(Syberfeldt et al., 2017)
- Le stockage moins important que tous les autres critères du fait de la possibilité de la lunette à se connecter à la base de données de l'entreprise via le wifi

Tableau 4 : Matrice de comparaison des critères des sous critères techniques

Sous-critères	Autonomie	Processeur	Mémoire	Caméra	Stockage
Autonomie	1,00	0,20	0,33	3,00	7,00
Processeur	5,00	1,00	2,00	7,00	8,00
Mémoire	3,00	0,50	1,00	6,00	7,00
Caméra	0,33	0,14	0,17	1,00	5,00
Stockage	0,14	0,13	0,14	0,20	1,00

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

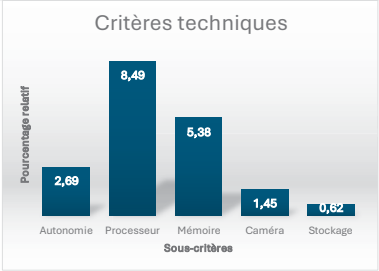
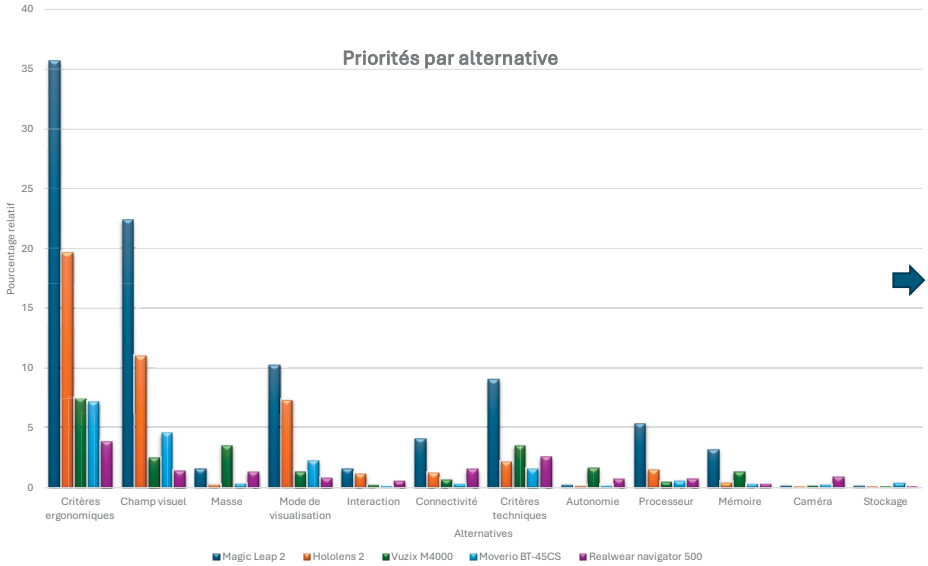


Figure 9 : Poids des sous critères techniques

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION



Magic Leap 2

Microsoft Hololens 2

Figure 10 : Résultat de l'AHP

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	METHODOLOGIE	RESULTATS	CONCLUSION

- La **méthodologie** présentée aide à effectuer un **choix de système d'assistance adapté à un poste de travail précis** en prenant en considération les **facteurs liés au système de travail**. Il garantit également les performances technologiques du système et une minimisation des risques ergonomiques.
- Les résultats de cette étude de cas montrent que dans un espace de travail restreint, les lunettes de réalité augmentée ou mixte sont la technologie la plus appropriée pour soutenir le travailleur dans les tâches d'assemblage et désassemblage.

Travaux à venir

- Etude de l'acceptabilité pratique des deux lunettes retenues.

Travaux futurs

- Etude de l'utilisabilité avec participants humains

Copyright 2024, R.Valdesse Eko'ola, K. Landau, S.Nadeau,
École de technologie supérieure

Merci pour votre attention

ANNEXE III

DIMENSIONS PERTINENTES DE LA CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE TRAVAIL

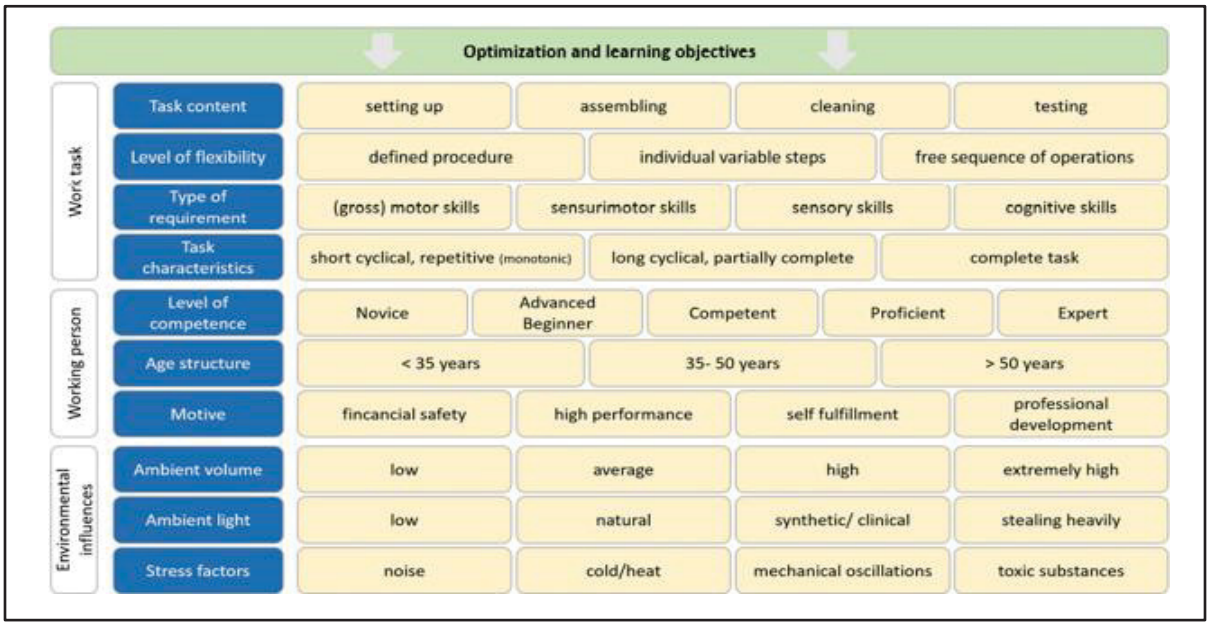


Figure-A III-1 Catégories du système de travail ayant une influence dans le processus de conception

Tirée de Haase et al. (2020)

Ce tableau présente les différents facteurs à prendre en compte lors de la conception du système d'assistance numérique; la nature de la tâche à accomplir, les caractéristiques individuelles des travailleurs et les influences environnementales. Par exemple la technologie ou la fonctionnalité d'assistance utilisée dans un milieu à forte nuisance sonore ne sera pas la même que celle qui sera utilisée dans un milieu à faible nuisance sonore ; la façon et la quantité d'informations fournies ne seront pas les mêmes pour un travailleur expérimenté et pour un novice. En effet dans une entreprise il existe un large éventail de travailleurs au niveau de compétences et expériences différents, de ce fait, les tâches d'assemblage sont décomposées à des degrés différents nécessitant une adaptation du support d'assistance au contexte et à l'utilisateur (Fredrich, Dick, & Haase, 2021).

ANNEXE IV

SIMULATION SUR CATIA V5 AVEC LA POPULATION MASCULINE

❖ Simulation du serrage final du premier étage avec la population masculine

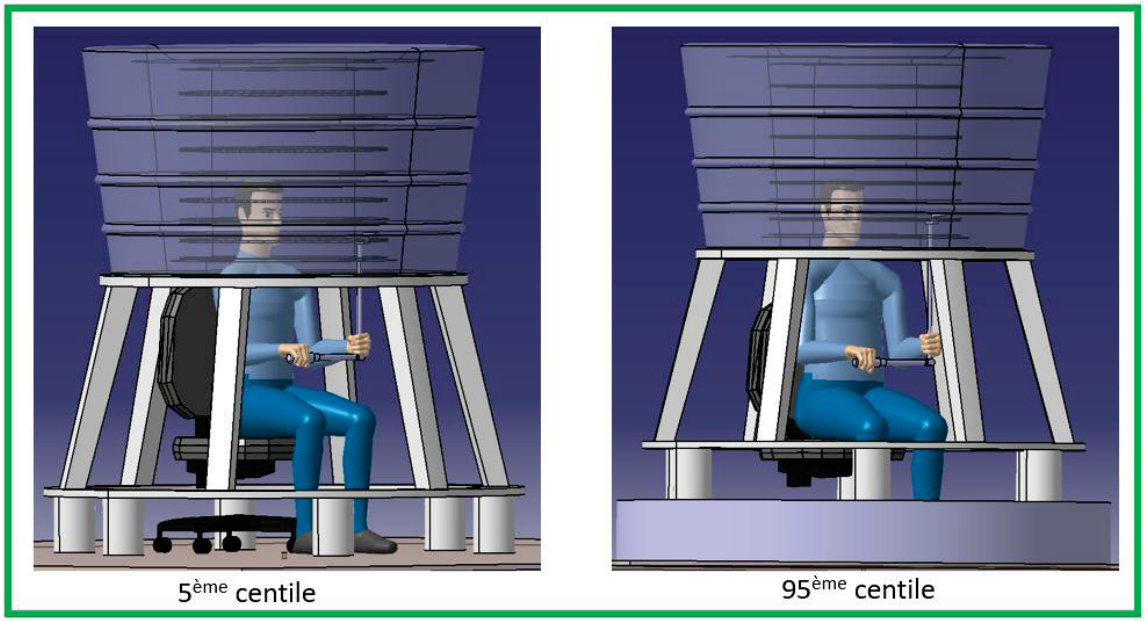


Figure-A IV-1 Simulation du serrage final du 1er étage par le 5e et 95e centile homme

Le boulonnage du premier étage se fait également en position assise pour tous les centiles hommes. Nous avons opté pour ce choix pour deux raisons :

- La première étant motivée par le fait que nous désirons que l'étage en cours de boulonnage soit situé aussi près que possible de la hauteur des yeux du mannequin sans impliquer que le mannequin entre entièrement dans la turbine.

- La deuxième raison est que nous voulons éviter de grandes élévations de la plateforme pour garantir un meilleur équilibre et une meilleure sécurité du technicien.

Pour permettre au 5e centile homme d'utiliser la même rallonge (48 cm de long) que le 5e et 95e centile femme pour le même étage de serrage, nous avons dû régler la hauteur du siège à 25,2 cm par rapport au sol. Cette hauteur est également très inférieure à la hauteur minimale de la chaise de travail mesurée chez le partenaire industriel. La plateforme élévatrice n'intervient pas ici, le mannequin effectue le boulonnage dans l'ancienne configuration du poste de travail en position assise.

Le 95e centile homme effectue également le serrage en position assise. L'étage de boulon est à la hauteur des yeux du mannequin et la clé d'assemblage à la hauteur des coudes. Tous les membres supérieurs sont maintenus entre les limites d'angle de confort. En dehors de la tête et du cou du mannequin, tout le reste de son corps est en dehors de l'espace restreint constitué par l'intérieur de la turbine. Il a une plus grande liberté de mouvement et moins de risques de se heurter les coudes durant ses mouvements.

Les paramètres de ce poste de travail sont tels que, la hauteur du siège est de 49 cm, la longueur de la rallonge est de 60 cm et la plateforme s'élève à une hauteur de 25,2 cm par rapport au sol.

❖ **Simulation du serrage final du deuxième étage avec la population masculine**

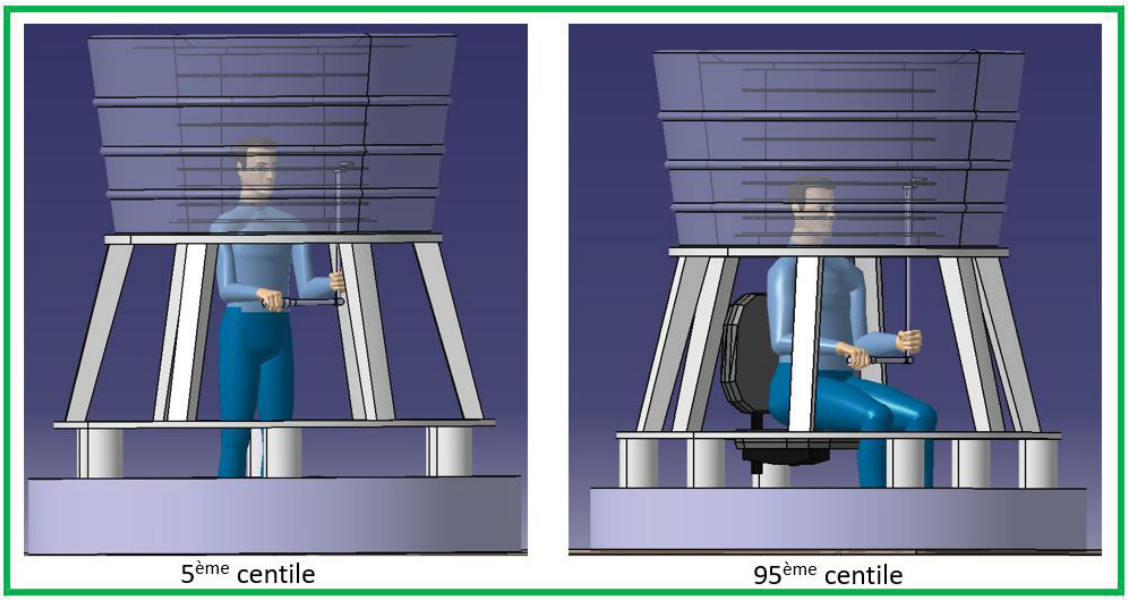


Figure-A IV-2 Simulation du serrage final du 2e étage par le 5e et 95e centile homme

Pour le boulonnage du deuxième étage avec le 5e centile homme, nous avons observé le même problème que lors de la simulation avec le 5e centile femme. En effet s'il faut exécuter le boulonnage en position assise, le réglage de la hauteur du siège pour atteindre les boulons imposent l'utilisation d'un pose pied. De ce fait, nous avons préconisé une exécution de la tâche en position debout. La plateforme est élevée à une hauteur de 30 cm par rapport au sol et le mannequin utilise une nouvelle rallonge de longueur 59 cm. Les boulons sont à hauteur des yeux et la clé d'assemblage est à la hauteur des coudes.

Pour ce qui est du 95e centile homme, en position assise l'étage de boulon est à hauteur des yeux du mannequin et la clé d'assemblage à la hauteur des coudes, nous avons constaté que le réglage adéquat du siège impose l'utilisation d'un pose pied pour permettre au mannequin de prendre appui sur ses pieds lors du serrage. Cependant, l'introduction d'un pose pied dans un espace de travail restreint peut augmenter les risques d'accident. En outre, il réduit encore plus l'espace disponible dans le poste de travail. Dès lors nous avons exclu l'idée de pose pied et à

la place, avons réduit la hauteur du siège. La conséquence de cette décision est que l'étage de boulon se retrouve un peu plus au-dessus de la hauteur des yeux du mannequin, mais toujours dans son champ visuel. Le mannequin a ses bras en dehors de l'espace restreint et donc il a une plus grande liberté de mouvement et moins de risques de se heurter les coudes durant ses mouvements.

Les paramètres de ce poste de travail pour le 95e centile homme sont tels que, la hauteur du siège est de 49 cm, la longueur de la rallonge est de 76 cm et la plateforme a une hauteur de 25,2 cm par rapport au sol. Ici nous avons décidé de garder la même hauteur de la plateforme qu'à l'étape du serrage finale du premier étage avec le mannequin au 95e centile. La raison de ce choix est qu'il est plus aisé et rapide de changer de rallonge que de régler une nouvelle hauteur de la plateforme.

❖ **Simulation du serrage final du troisième étage avec la population masculine**

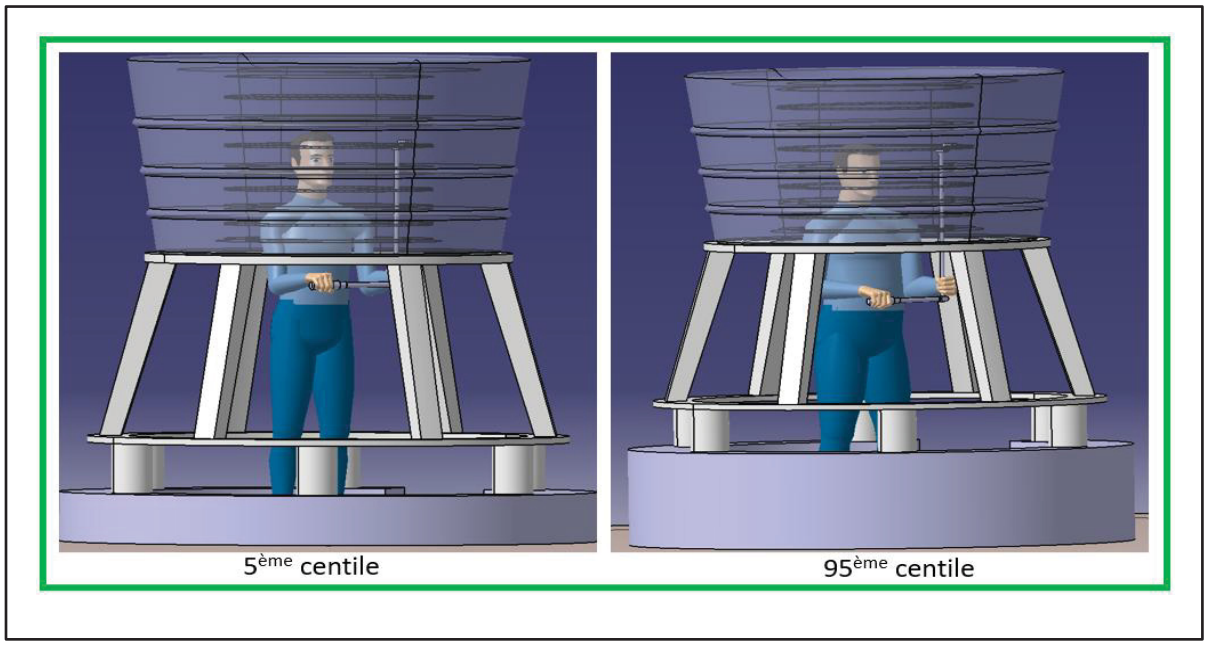


Figure-A IV-3 Simulation du serrage final du troisième étage
par le 5e et 95e centile homme

Pour le dernier étage, le serrage se fait dans la nouvelle configuration du poste de travail et en position debout pour tous les centiles homme. Les paramètres du poste de travail pour le 95e centile homme sont tels que la rallonge mesure 76cm et la plateforme est élevée d'une hauteur de 45 cm par rapport au sol.

Pour ce qui est du poste de travail pour le 5e centile homme, les paramètres sont tels que la rallonge mesure environ 61 cm et la plateforme a une hauteur de 20 cm par rapport au sol. La différence de longueur entre cette rallonge et celle utilisée par le 95e centile homme pour le serrage final du premier étage est de 1 cm. La différence étant minime, nous proposons que la même rallonge soit utilisée pour les deux situations, ceci dans le but d'éviter d'avoir une multitude d'outils pour assembler la turbine. Ainsi le 95e centile homme et le 5e centile homme utiliseront une rallonge de 61 cm de long lors du serrage final respectivement du premier étage et du troisième étage de boulon. La marge de manœuvre sur les angles de flexion des bras laissé durant les modélisations des postures est suffisante pour que la différence de 1cm relevée plus haut sur la longueur des deux rallonges n'impacte pas négativement sur la posture de travail.

ANNEXE V

ÉVALUATION ERGONOMIQUE DES POSTURES LORS DU BOULONNAGE FINAL DES ÉTAGES DE BOULONS

❖ 5e centile femme 1er étage

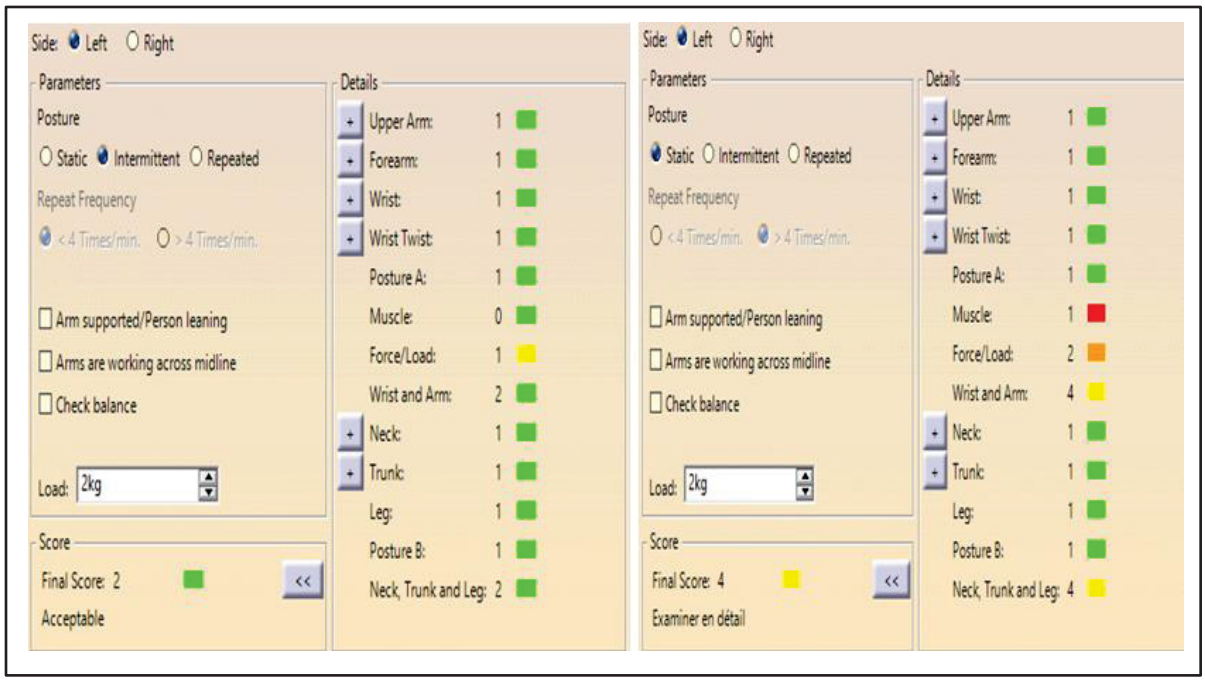


Figure-A V-1 Étage 1_Score RULA du côté gauche du 5e centile femme

Lorsque nous définissons que la posture du bras gauche est intermittente, nous obtenons un score de 1 si la masse de l'outil supporté est inférieure à 2 kg, un score de 2 si l'outil a une masse inférieure ou égale à 10 kg et un score de 3 pour un outil ayant une masse supérieure à 10 kg (jusqu'à 10 kg, c'est le même score). Si la posture est statique, le score passe de 2 à 4 pour une masse variant entre 2 et 10 kg.

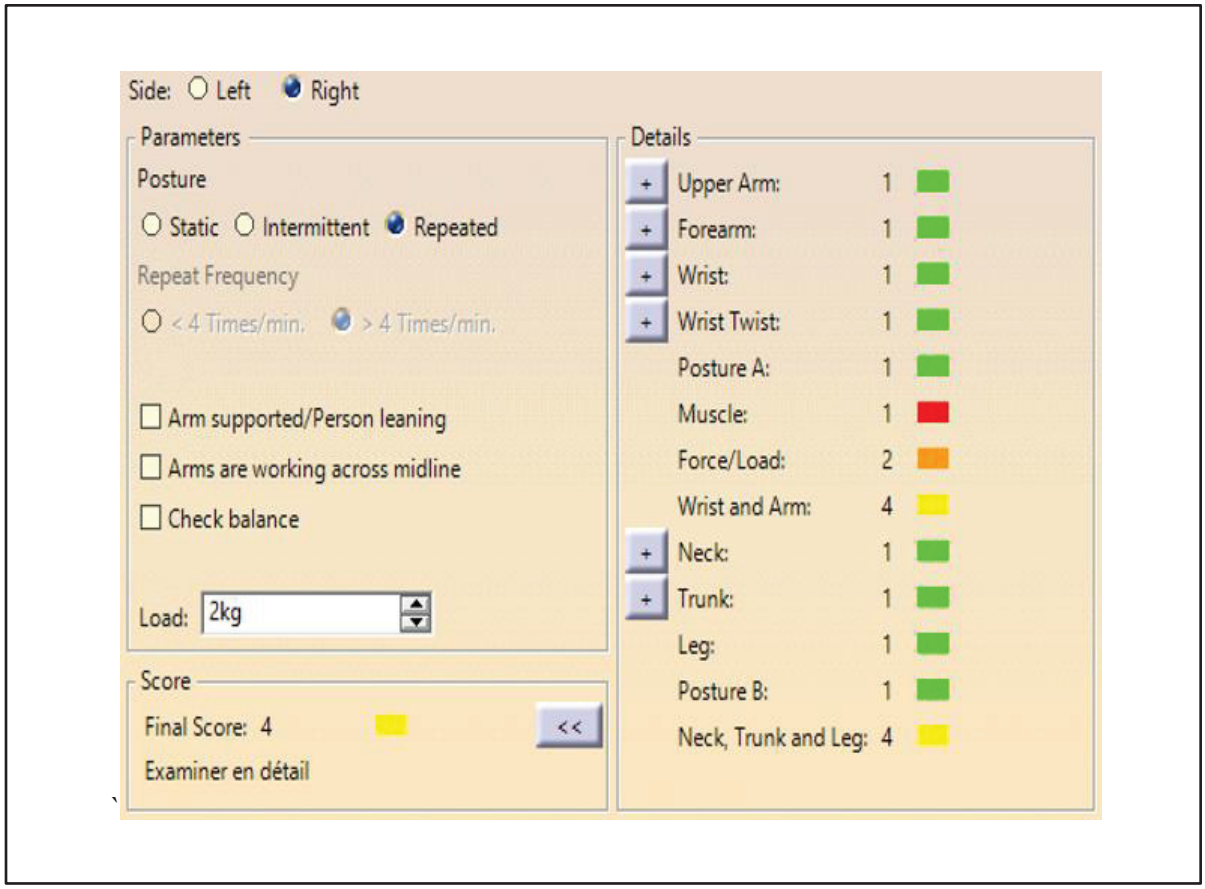


Figure-A V-2 Étage 1_Score RULA du côté droit du 5e centile femme

Le score du côté droit, pour une masse allant de 2kg à 10kg, est de 4.

❖ 5e centile femme au 2e étage

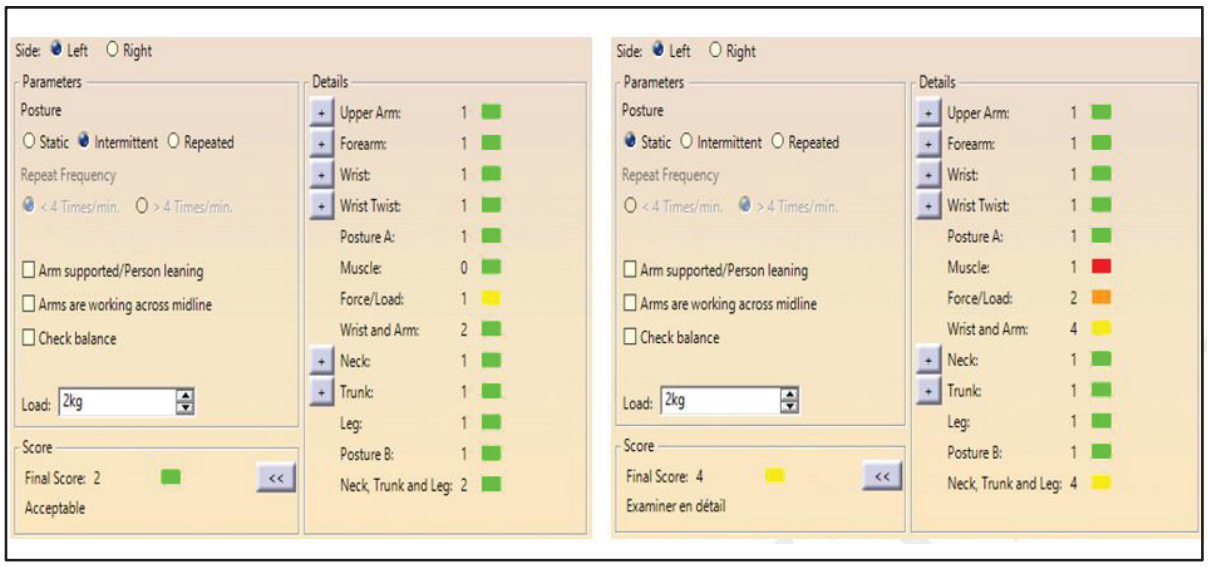


Figure-A V-3 Étage 2_Score RULA du côté gauche du 5e centile femme

Pour le côté gauche en considérant la posture intermittente, nous avons un score de 2 pour un outil avec une masse pouvant aller jusqu'à 10 kg. Et un score de 1 pour un outil avec une masse inférieure à 2 kg. En considérant que la posture de la main gauche est statique, nous obtenons un score RULA de 4 pour une charge variant entre 2 et 10 kg.

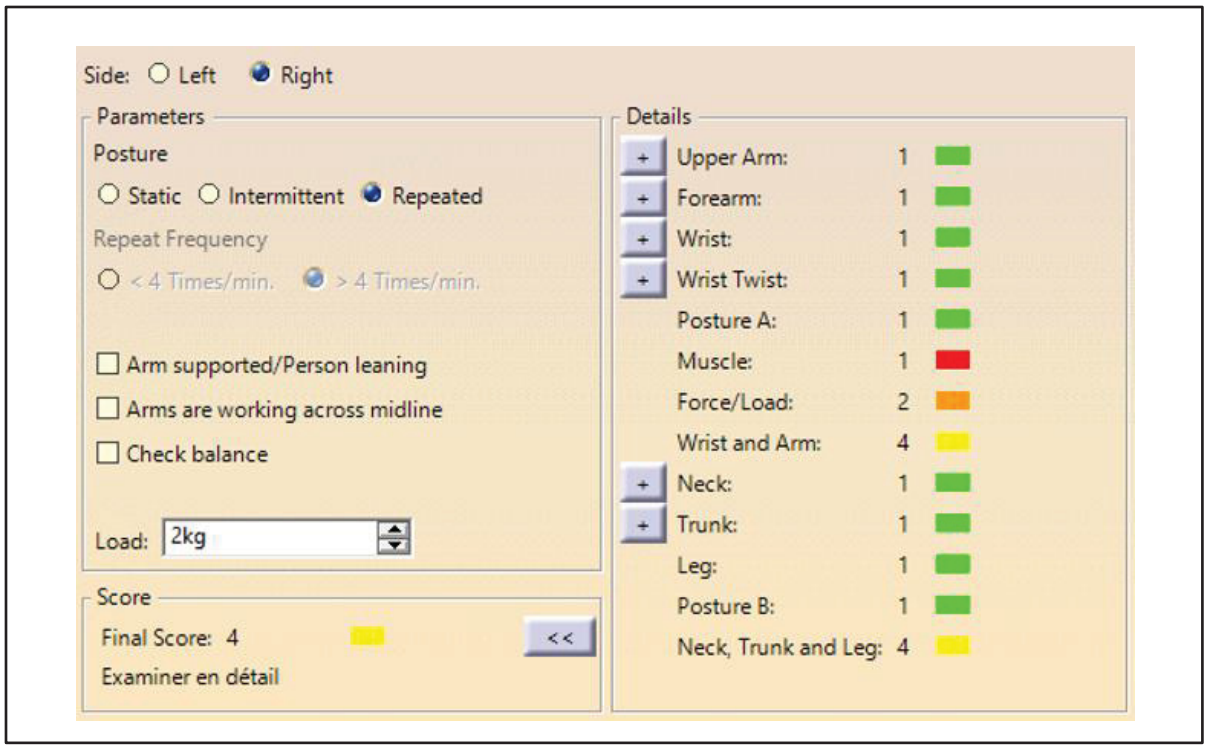


Figure-A V-4 Étage 2_Score RULA du côté droit du 5e centile femme

Pour le côté droit, nous obtenons le même score qu'à l'étage 1 : Score RULA de 4 avec une charge qui varie entre 2 et 10 kg.

❖ 5e centile femme au 3e étage

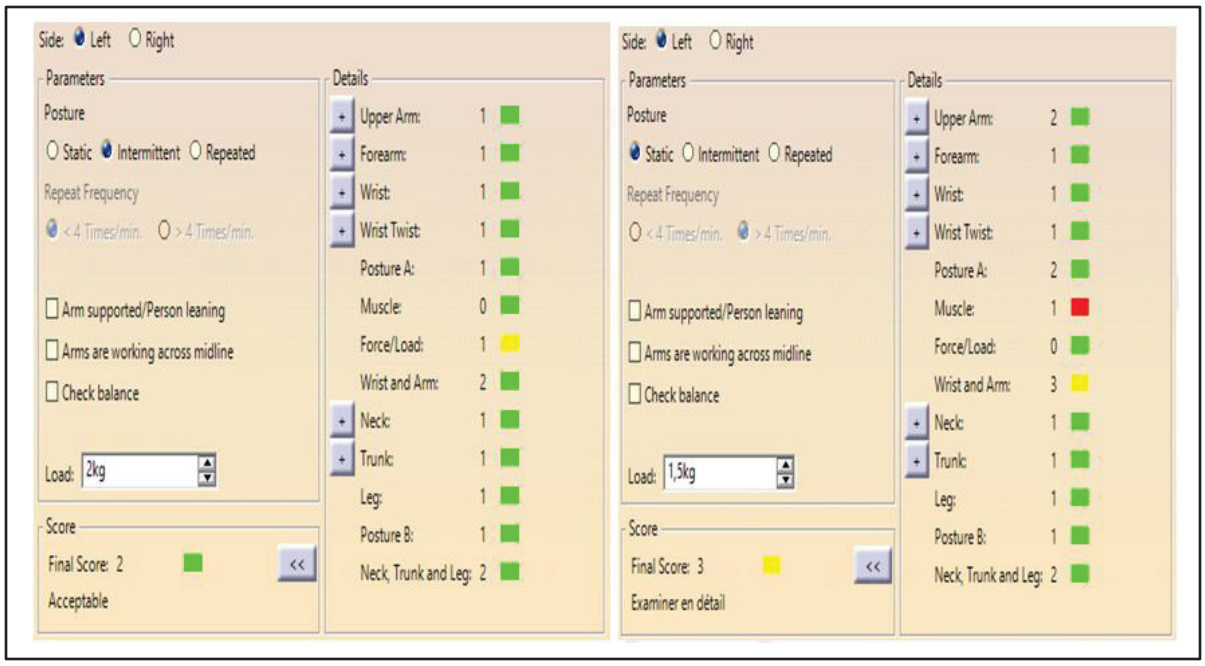


Figure-A V-5 Étage 3_Score RULA du côté gauche du 5e centile femme

Pour le côté gauche en considérant la posture intermittente, nous avons un score de 2 pour une charge pouvant aller jusqu'à 5 kg.

Lorsque nous définissons que la posture du côté gauche est statique, nous obtenons un score de 2 si l'outil tenu à la main a une masse de 1 kg; un score de 3 pour un outil ayant une masse supérieure à 2 kg (jusqu'à 10 kg de charge, le score reste inchangé).

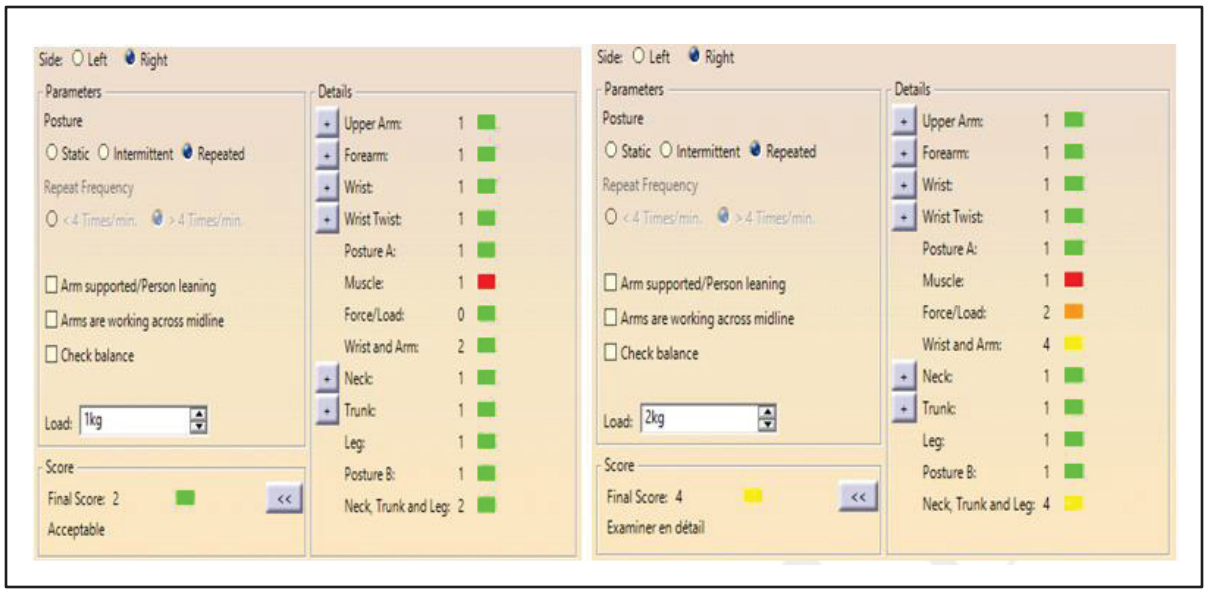


Figure-A V-6 Étage 3_Score RULA du côté droit du 5e centile femme

Pour le côté droit, nous avons réalisé l'analyse en faisant varier la masse : à 1 kg, le score RULA est de 2 et pour une masse allant de 2 à 10 kg, nous avons obtenu un score RULA de 4. Étant donné que dans notre contexte d'étude, la masse totale des deux outils utilisés par le travailleur est supérieure à 2kg , le score que nous retenons est donc celui de 2.

❖ 95e centile homme 1er étage

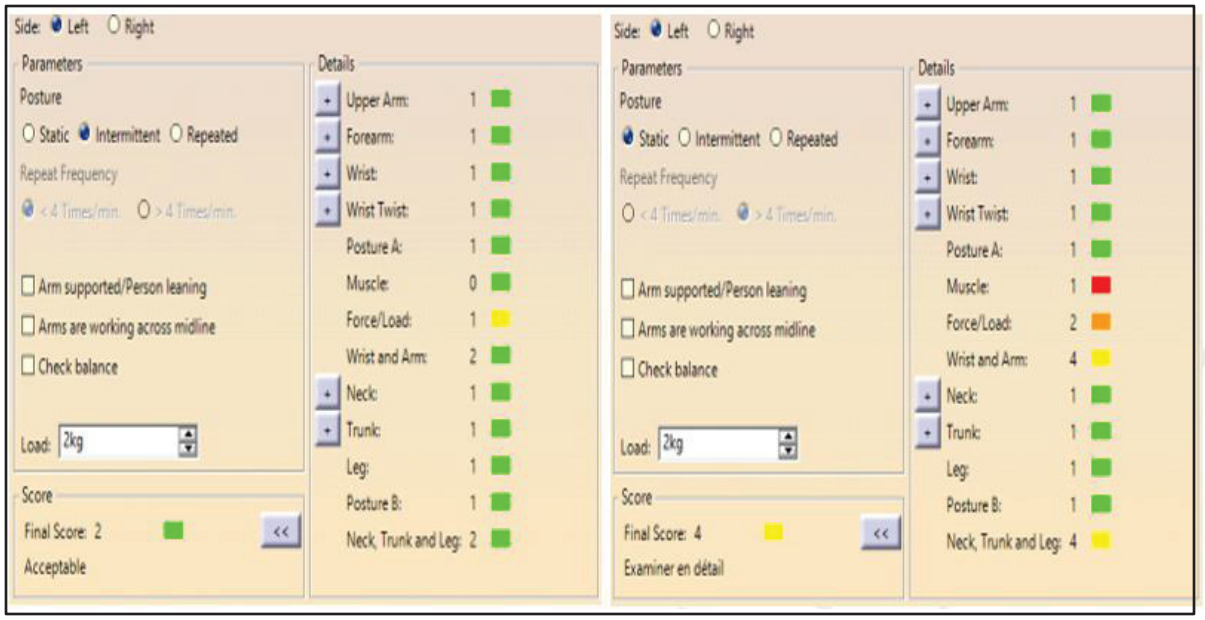


Figure-A V-7 Étage 1_Score RULA du côté gauche du 95e centile homme

Avec le mannequin homme au 95e centile de la population canadienne, le score RULA pour la posture de travail proposée est de 2 pour le côté gauche intermittent avec une charge inférieure à 10 kg. Dans l'hypothèse où la posture est statique, le score passe à 4 pour le côté gauche avec une charge variant entre 2 et 10 kg.

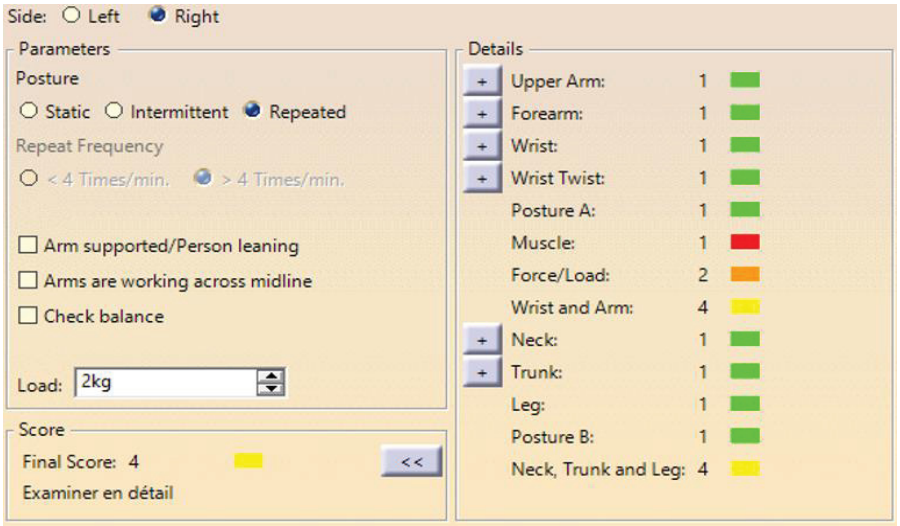


Figure-A V-8 Étage 1_Score RULA du côté droit du 95e centile homme

Le bras droit effectue des mouvements répétés et son score RULA est de 4 avec une charge variant entre 2 et 10 kg.

❖ 95e centile homme 2e étage

Pour cet étage, nous obtenons exactement les mêmes scores RULA qu'à l'étage précédent avec le même mannequin. Ceci s'explique par le fait que les changements dans les paramètres du poste de travail (hauteur siège, longueur rallonge, hauteur, plateforme) pour le deuxième étage de boulons permettent de garder quasiment intacte la posture de travail adoptée au premier étage. Étant donné que la longueur de la rallonge change, alors nécessairement la masse de la rallonge et donc la charge totale supportée par les bras change. Cependant, comme le présente la figure ci-dessus, le score RULA ne varie pas tant que la charge demeure dans l'intervalle de 2 et 10 kg.

❖ 95e centile homme 3e étage

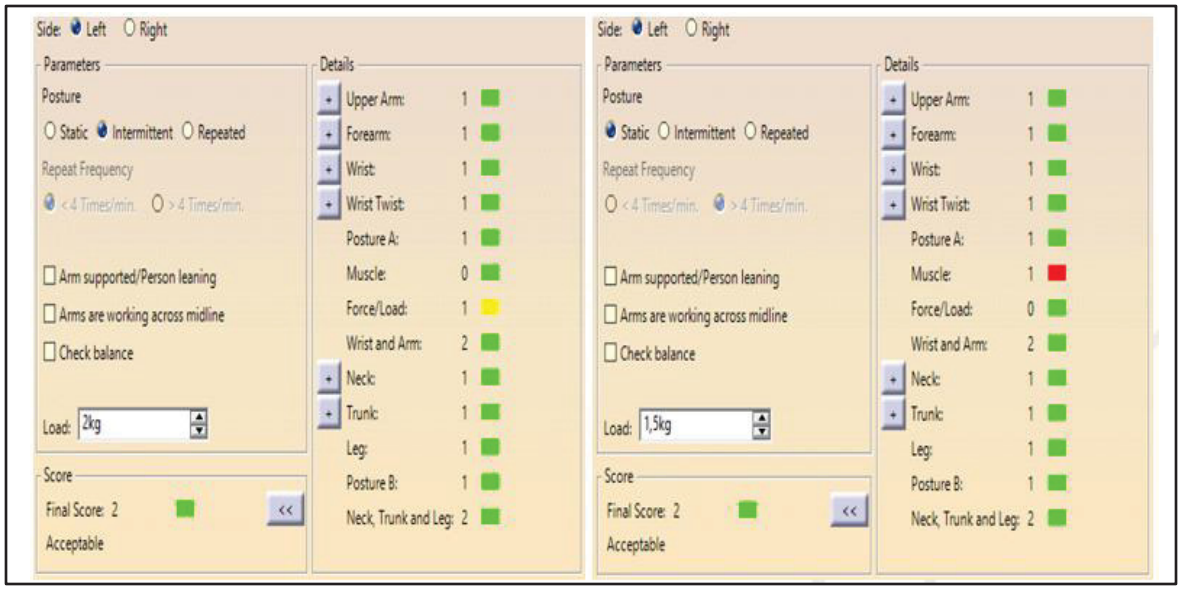


Figure-A V-9 Étage 3_Score RULA du côté gauche du 95e centile homme

Lorsque nous définissons que la posture du côté gauche est intermittente, nous obtenons un score de 2 si l'outil a une masse de 1 kg et un score de 4 pour un outil ayant une masse supérieure 2 kg (jusqu'à 10 kg, c'est le même score).

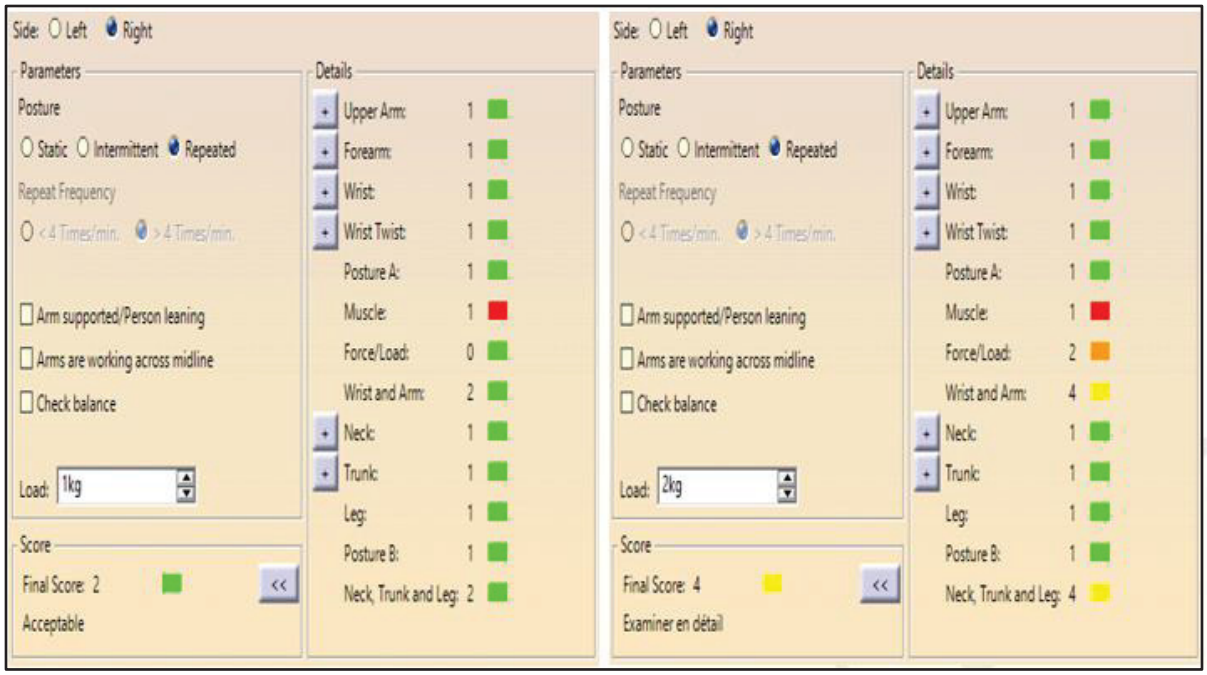


Figure-A V-10 Étage 3_Score RULA du côté droit du 95e centile homme

Pour le côté droit, le score est de 4 pour une charge variant entre 2 et 10 kg.

ANNEXE VI

LISTE DES LUNETTES PRÉSÉLECTIONNÉES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

Tableau-A VI-1 Lunettes présélectionnées et leurs caractéristiques

Compagnie	VUZIX corporation (West Henrietta, New York)		
Nom	M 300	M 400	M4000
Apparence			
Année	2017	2019	2020
Prix		1799.99 USD	2 499.99 US
Masse (g)	140	130	222
Batterie (mAh)	Interne 160 860 externe	Interne 135 Externe 750 remplaçable à chaud Ou banque d'alimentation 4800	Interne 135 Externe 1000 remplaçable à chaud Ou banque d'alimentation 4800
Autonomie (h)	2-12 avec possibilité de batterie externe	2-12 en fonction du choix de la batterie externe	2-12 en fonction du choix de la batterie externe
Champ visuel	20° diagonal	16.8° diagonal	Monoculaire 28°
Optique	Monoculaire Format : 16:9 Écran couleur nHD	Monoculaire Format d'image : 16:9 Écran couleur nHD Type d'affichage : OLED 640*360 pixels Couleur 24 bits avec vrai noir	Monoculaire Format d'image : 16:9 Optique transparente guide d'onde Type d'affichage DLP 854*480 pixels
Camera	Images fixes jusqu'à 10 mégapixels Vidéo jusqu'à 1080p 24 ips Mise au point automatique rapide Stabilisation optique de l'image Éclairage flash/scène	Images fixes jusqu'à 12,8 mégapixels Vidéo jusqu'à 4k30 Mise au point automatique améliorée (PDAF) Stabilisation optique de l'image améliorée Flash LED/éclairage de scène Lecture de codes-barres	Images fixes jusqu'à 12,8 mégapixels Vidéo jusqu'à 4k30 Mise au point automatique améliorée (PDAF) Stabilisation optique de l'image améliorée Flash LED/éclairage de scène Lecture de codes-barres

Compagnie	VUZIX corporation (West Henrietta, New York)		
Nom	M 300	M 400	M4000
Apparence			
Audio	Haut-parleur d'oreilles 2 microphones antibruits	Haut-parleur intégré (sortie jusqu'à 97 dB) Triples microphones antibruits Audio BT : HSP/A2DP	Haut-parleur intégré (sortie jusqu'à 97 dB) Triples microphones antibruits Audio BT : HSP/A2DP
Capteurs	Suivi de la tête à 3 degrés de liberté Gyroscope 3 axes Accéléromètre 3 axes Chargeur 3 axes/boussole intégrée Capteur de proximité	Suivi de la tête à 3 degrés de liberté Gyroscope 3 axes Accéléromètre 3 axes Chargeur 3 axes/boussole intégrée GPS/GLONASS	Suivi de la tête à 3 degrés de liberté Gyroscope 3 axes Accéléromètre 3 axes Chargeur 3 axes/boussole intégrée GPS/GLONASS
Interactions	4 boutons Commande vocale Pavé tactile à 2 axes avec geste	3 boutons Pavé tactile à 2 axes avec prise en charge multidoigts Commande vocale personnalisable	3 boutons Pavé tactile à 2 axes avec prise en charge multidoigts Commande vocale personnalisable
Processeur		8 cœurs Qualcomm XR1 2,52 GHz	8 cœurs Qualcomm XR1 2,52 GHz
Stockage	64 GB interne	64 GB interne	64 GB interne
RAM	2 GB	6 Go de RAM LPDDR4	6 Go de RAM LPDDR4
Connectivité	Wifi 2.4GHz 802.11a/b/g/n ac MIMO 2*2 Bluetooth 4.1/2.1+EDR Micro-USB	USB 3.1 Gen 2 sur USB Type-C wifi 2.4/5Ghz 802.11 a/b/g/n/ac Bluetooth 5.0 BR/EDR/LE	USB 3.1 Gen 2 sur USB Type-C wifi 2.4/5Ghz 802.11 a/b/g/n/ac Bluetooth 5.0 BR/EDR/LE
Résistance à la poussière	---	IP67	IP67
Résistance à l'eau	---	IP67	IP67

Compare Smart Glasses – Vuzix

V11H756020 | Moverio BT-300 Smart Glasses (AR/Developer Edition) | Epson Customer Appreciation Program | Epson Canada

HoloLens 2 – Présentation, fonctions et spécifications | Microsoft HoloLens

Tableau-A VI-2 Tableau de lunettes présélectionnées
et leurs caractéristiques (Suite 1)

Compagnie	EPSON (20 Barket Crt, MARKHAM ONTARIO L3P 3X8)		MICROSOFT (Redmond, Washington)
Nom	Moverio BT-300	Moverio BT-45CS	Hololens 2
Apparence			
Année	2016	2022	2019
Prix	779 USD	2 079 USD	3 849 euros
Masse (g)	129	550 (kit complet)	556
Batterie (mAh)	---	3 400	
Autonomie (h)	6	---	2-3
Champ visuel	20° horizontal 11° vertical 23° diagonal	34° diagonal	43° horizontal 29° vertical 52° diagonal
Optique	Optique transparente Binoculaire 5 MP image fixe 24-bit HD couleur Format d'image : 16:9	Optique transparente Binoculaire Si-OLED Taux de rafraichissement :60Hz Format d'image : 16:9	Lentilles holographiques transparentes (guide d'onde) Binoculaire 1440*936 pixels par œil
Camera	5 MP 720 p	13 MP Mise au point automatique	8 MP 1080 p
Audio	4-pin mini Jack	Haut-parleur intégré (sortie jusqu'à 80 dB) Prise jack audio 3,5 mm, prise mini-jack 4 broches (écouteurs avec microphone)	Audio spatial intégré Microphone intégré (5 canaux)

Compagnie	EPSON (20 Barket Crt, MARKHAM ONTARIO L3P 3X8)		MICROSOFT (Redmond, Washington)
Nom	Moverio BT-300	Moverio BT-45CS	Hololens 2
Apparence			
Capteurs	Géomagnétique Accéléromètre Gyroscope Lumière ambiante GPS	Géomagnétique Accéléromètre Gyroscope Lumière ambiante GPS	Suivi de la tête (4 caméras) Suivi des yeux (2 caméras) Profondeur Accéléromètre Gyroscope Magnétomètre
Interactions	Boutons Pointage tactile	Boutons Écran tactile	Suivi des mains (deux mains entièrement articulées, manipulation directe) Suivi des yeux en temps réel Mouvement de la tête Commande vocale
Processeur	Intel Atom* 5 (1.44GHz) 4 cœurs	---	Qualcom snapdragon 850
Stockage	16 GB interne microSDHC jusqu'à 32 GB	64 GB interne Micro SDXC (2 TB max)	64 GB interne
Mémoire	RAM 2 GB	RAM 4 GB	DRAM 4 GB
Connectivité	Wifi 2.4GHz 802.11a/b/g/n ac Bluetooth 4.1 Micro-USB	Bluetooth 5 USB Type-C	wifi 5 Bluetooth 5 USB Type-C Windows Hello (reconnaissance de l'iris)
Résistance à la poussière	Non	IP 52	IP 50
Résistance à l'eau	Non	IP52	Non

Tableau-A VI-3 Tableau de lunettes présélectionnées et leurs caractéristiques (Suite 2)

Compagnie	MAGIC LEAP (Plantation, Floride)	REAL WEAR (600 Hatheway Road Suite 105, Vancouver, WA 98661)
Nom	Magic leap 2	RealWear navigator 500
Apparence		
Année	2022	2021
Prix	3 299 USD	2 060 euros
Masse (g)	260	272
Batterie (mAh)	5 800	2 600 Remplaçable à chaud
Autonomie	3.5	8
Champ visuel	44° horizontal 53° vertical 70° diagonal	20° diagonal
Optique	Binoculaire Optique transparente Écran LCD	Monoculaire Écran LCD 854*480 pixels
Camera	12.6 MP 4K à 30 FPS ou 1920*1080 à 60 FPS Mise au point automatique	48 MP 1080 p à 60 FPS Stabilisateur de vidéo Caméra thermique

Compagnie	MAGIC LEAP (Plantation, Floride)	REAL WEAR (600 Hatheway Road Suite 105, Vancouver, WA 98661)
Nom	Magic leap 2	RealWear navigator 500
Apparence		
Audio	Audio spatial intégré 4 microphones	4 microphones avec suppression du bruit Haut-parleur intégrés 94dB
Capteurs	Caméra de profondeur Lumière ambiante Suivi des yeux Accéléromètre Gyroscope Magnétomètre Altimètre	
Interactions	Suivi des mains et des gestes Clavier virtuel et réel Souris Suivi des yeux en temps réel Mouvement de la tête Commande vocale	Commande vocale Suivi du regard
Processeur	AMD Quad-core Zen2* 86	Qualcom snapdragon 662
Stockage	256 GB	64 GB
Mémoire	RAM 16 GB	RAM 4 GB
Connectivité	Wifi 6 Bluetooth 5 USB type C	Bluetooth 5.1 Wifi 802.11 a/b/g/n/ac – 2.4 GHz and 5GHz
Résistance à la poussière	---	IP 66
Résistance à l'eau	---	IP 66

Magic Leap 2 | The most immersive enterprise AR device

HMD Display | Industrial Wearable Technology | RealWear Navigator 500

ANNEXE VII

CALCUL DES RATIOS DE COHÉRENCE DES MATRICES DE COMPARAISONS BINAIRES

Tableau-A VII-1 Valeur de ACI en fonction de la dimension de la matrice

Dimension de la matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cohérence aléatoire ACI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Soient les matrices M1, M2 et M3 représentant respectivement les matrices de comparaison des critères du 1er niveau hiérarchique, du 2e niveau hiérarchique par rapport aux critères ergonomiques et du 2e niveau hiérarchique par rapport aux critères techniques.

$$M1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 \\ 0,2 & 1 & 3 \\ 0,125 & 0,33 & 1 \end{bmatrix};\ M2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 8 \\ 0,33 & 1 & 5 & 9 \\ 0,142 & 0,2 & 1 & 3 \\ 0,125 & 0,11 & 0,33 & 1 \end{bmatrix};\ M3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 7 & 8 \\ 0,5 & 1 & 3 & 6 & 7 \\ 0,2 & 0,33 & 1 & 3 & 7 \\ 0,14 & 0,16 & 0,33 & 1 & 5 \\ 0,125 & 0,14 & 0,14 & 0,2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{A VII-1}$$

La première étape consiste au calcul des vecteurs propres W1, W2 et W3 correspondant aux poids des critères et associés respectivement aux trois matrices M1, M2 et M3. Pour cela il suffit pour chaque matrice de calculer les sommes des colonnes, ensuite diviser chaque nombre de la colonne par la somme de la même colonne et enfin calculer la moyenne de chaque ligne de la matrice. Les calculs effectués sur Excel ont donné les résultats suivants :

$$W1 = \begin{bmatrix} 0,736952444 \\ 0,186279378 \\ 0,076768178 \end{bmatrix};\ W2 = \begin{bmatrix} 0,556590996 \\ 0,310927158 \\ 0,088367057 \\ 0,044114789 \end{bmatrix};\ W3 = \begin{bmatrix} 0,22775158 \\ 0,14440134 \\ 0,07230829 \\ 0,03902338 \\ 0,01651541 \end{bmatrix} \quad \text{A VII-2}$$

L'étape qui suit est le calcul du produit matriciel entre chaque matrice de comparaison et son vecteur propre.

$$M1*W1 = \begin{bmatrix} 2,282494759 \\ 0,563974401 \\ 0,23098036 \end{bmatrix}; M2 * W2 = \begin{bmatrix} 2,460860181 \\ 1,335325878 \\ 0,362409856 \\ 0,177691812 \end{bmatrix}; M3*W3 = \begin{bmatrix} 1,283382647 \\ 0,824950146 \\ 0,398670403 \\ 0,202306033 \\ 0,083747554 \end{bmatrix} \quad \text{A VII-3}$$

L'étape suivante est le calcul des valeurs propres maximales $\lambda 1max$, $\lambda 2max\ et\ \lambda 3max$ correspondant respectivement aux matrices M1, M2 et M3. Le calcul des λ_{ij} $(1 \leq i \leq 3\ et\ 1 \leq j \leq 5)$ se font en utilisant la formule $\lambda_{ij}=\frac{[Mi*Wi]_j}{W_j}$

$$\lambda_{1max} = \frac{\lambda_{11} + \lambda_{12} + \lambda_{13}}{3}$$

$$\lambda_{11} = \frac{2,282494759}{0,736952444}$$

$$\lambda_{12} = \frac{0,563974401}{0,186279378}$$

$$\lambda_{13} = \frac{0,23098036}{0,076768178}$$

$$\boldsymbol{\lambda_{1max} = 3,044528}$$

$$\lambda_{2max} = \frac{\lambda_{21} + \lambda_{22} + \lambda_{23} + \lambda_{24}}{4}$$

$$\lambda_{21} = \frac{2,460860181}{0,556590996}$$

$$\lambda_{22} = \frac{1,335325878}{0,310927158}$$

$$\lambda_{23} = \frac{0,362409856}{0,088367057}$$

$$\lambda_{24} = \frac{0,177691812}{0,044114789}$$

$$\boldsymbol{\lambda_{2max} = 4,211274}$$

$$\lambda_{3max} = \frac{\lambda_{31} + \lambda_{32} + \lambda_{33} + \lambda_{34} + \lambda_{35}}{5}$$

$$\lambda_{31} = \frac{1{,}283382647}{0{,}22775158} \qquad \lambda_{33} = \frac{0{,}398670403}{0{,}07230829}$$

$$\lambda_{32} = \frac{0{,}824950146}{0{,}14440134} \qquad \lambda_{34} = \frac{0{,}202306033}{0{,}03902338}$$

$$\lambda_{35} = \frac{0{,}083747554}{0{,}01651541}$$

$$\boldsymbol{\lambda_{3max} = 5{,}423298}$$

A VII-4

La dernière étape consiste au calcul de l'indice de cohérence IC et le ratio de cohérence RC pour chaque matrice. Ces calculs se font sur la base des formules suivantes :

$$IC_i = \frac{\lambda_{imax} - n_i}{n_i - 1} \quad et \quad RC_i = 100 * \frac{IC_i}{ACI_i}$$

A VII-5

Où :

$$\begin{cases} 1 \leq i \leq 3 \\ n_i \text{ représente la dimension de la matrice } i \\ \lambda_{imax} \text{ représente la valeur propre maximale de la matrice } i \\ IC_i \text{ représente l'indice de cohérence de la matrice } i \\ RC_i \text{ représente le ratio de cohérence de la matrice } i \\ ACI_i \text{ représente la cohérence aléatoire de la matrice } i \end{cases}$$

Les calculs ont donné les résultats ci-dessous :

$$IC_1 = \frac{3{,}044528 - 3}{3 - 1} \qquad IC_2 = \frac{4{,}211274 - 4}{4 - 1} \qquad IC_3 = \frac{5{,}423298 - 5}{5 - 1}$$

$$IC_1 = 0{,}022264 \qquad IC_2 = 0{,}070425 \qquad IC_3 = 0{,}105824 \qquad \text{A VII-6}$$

$$RC_1 = 100 * \frac{0{,}022264}{0{,}58} \qquad RC_1 = 100 * \frac{0{,}070425}{0{,}9} \qquad RC_1 = 100 * \frac{0{,}105824}{1{,}12}$$

$$\boxed{\boldsymbol{RC_1 = 3{,}8\%}} \qquad \boxed{\boldsymbol{RC_1 = 7{,}8\%}} \qquad \boxed{\boldsymbol{RC_1 = 9{,}4\%}}$$

Le calcul des ratios de cohérence des autres matrices de comparaison binaires est exécuté de façon pareille.

ANNEXE VIII

APPRÉCIATION DE LA GRAVITÉ DU RISQUE

Gravité (G)	Cote	Description[9]
Mineure	G1	Lésion légère ne nécessitant que les premiers secours avec ou sans temps de travail perdu. Ex. : contusion, irritation du nez et de la gorge ou de la peau, blessure superficielle, fatigue oculaire, mal de tête, coupure mineure, ecchymoses, irritation mécanique des yeux causée par la poussière, petite surface avec une brûlure superficielle (premier degré), fatigue, irritabilité.
Modérée	G2	Lésion sans séquelles permanentes nécessitant une consultation médicale et un arrêt du travail. Ex. : perforation, coupure profonde, corps étranger dans l'œil, irritation grave des yeux, abrasion de la cornée réversible, fracture ou entorse mineure sans séquelles, tendinite stade 2* et bursite, grande surface avec une brûlure superficielle (premier degré), intoxication légère, détresse psychologique. * tendinite stade 2 : initialement calmée par le mouvement, la tendinite réapparaît en cours d'activité de façon de plus en plus précoce et intense.
Grave	G3	Lésion irréversible, invalidité légère ou grave avec un retour au travail possible dans le même emploi ou un emploi différent. Ex. : perte d'une portion de doigt ou d'une portion d'un membre (peau et muscle), atteinte permanente (exemple : entorse avec séquelles fonctionnelles), rupture d'un muscle ou d'un tendon, fracture majeure, brûlure avec lésion profonde (deuxième et troisième degré), perte d'un œil, nécessité de reconstruire une main ou un membre avec une perte de mobilité, commotion cérébrale, tendinite stade 3*, syndrome vibratoire main-bras, syndrome du tunnel carpien, dépression majeure, épuisement professionnel, intoxication, allergie cutanée, sensibilisation (béryllium, etc.), asthme professionnel. * tendinite stade 3 : la douleur est permanente, plus ou moins bien calmée par le repos, et empêche toute activité. Dans de rares cas, la douleur est nocturne, empêchant le sommeil.
Très grave	G4	Lésion permanente qui empêche le retour au même emploi ou qui a un impact important sur la qualité de vie du travailleur ou de la travailleuse. Ex. : décès, amputation d'un bras ou d'une jambe, polytraumatisme, amiantose, surdité, intoxication importante, silicose, cancer, bérylliose, coup de chaleur, perte de la vue (cécité), tentative de suicide.

Figure-A VIII-1 Niveau de gravité

Tirée du guide du processus de l'appréciation du risque (CNESST & IRSST, 2024)

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Agarwal, R., & Karahanna, E. (2000). Time Flies When You're Having Fun: Cognitive Absorption and Beliefs about Information Technology Usage. *MIS Quarterly*, *24*(4), 665. https://doi.org/10.2307/3250951

Aheleroff, S., Mostashiri, N., Xu, X., & Zhong, R. Y. (2021). Mass Personalisation as a Service in Industry 4.0: A Resilient Response Case Study. *Advanced Engineering Informatics*, *50*, 101438. https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101438

Aouam, D., Benbelkacem, S., Zenati, N., Zakaria, S., & Meftah, Z. (2018). Voice-based Augmented Reality Interactive System for Car's Components Assembly. Dans *2018 3rd International Conference on Pattern Analysis and Intelligent Systems (PAIS)* (pp. 1-5). Tebessa : IEEE. https://doi.org/10.1109/PAIS.2018.8598516

Aranda-García, S., Santos-Folgar, M., Fernández-Méndez, F., Barcala-Furelos, R., Pardo Ríos, M., Hernández Sánchez, E., … Rodríguez-Núñez, A. (2022). "Dispatcher, Can You Help Me? A Woman Is Giving Birth". A Pilot Study of Remote Video Assistance with Smart Glasses. *Sensors*, *23*(1), 409. https://doi.org/10.3390/s23010409

Asadi, H., Yu, D., & Mott, J. H. (2019). Risk factors for musculoskeletal injuries in airline maintenance, repair & overhaul. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *70*, 107-115. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.01.008

Barrett, J. (2004). Side Effects of Virtual Environments: A Review of tlie Literature.

Barthelme, J., Sauter, M., Mueller, C., & Liebers, F. (2021). Association between working in awkward postures, in particular overhead work, and pain in the shoulder region in the context of the 2018 BIBB/BAuA Employment Survey. *BMC Musculoskeletal Disorders*, *22*(1), 624. https://doi.org/10.1186/s12891-021-04482-4

Basoglu, N., Ok, A. E., & Daim, T. U. (2017). What will it take to adopt smart glasses: A consumer choice based review? *Technology in Society*, *50*, 50-56. https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2017.04.005

Basting, O., Fuhrmann, A., & Grunvogel, S. M. (2017). The effectiveness of changing the field of view in a HMD on the perceived self-motion. Dans *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 225-226). Los Angeles, CA, USA : IEEE. https://doi.org/10.1109/3DUI.2017.7893353

Bertarini, M. (2014). Smart glasses: Interaction, privacy and social implications.(2014). *Retrieved October*, *15*, 2020.

Beuß, F., Sender, J., & Flügge, W. (2019). Ergonomics Simulation in Aircraft Manufacturing – Methods and Potentials. *Procedia CIRP*, *81*, 742-746. https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.187

Bläsing, D., & Bornewasser, M. (2020). Influence of Complexity and Noise on Mental Workload During a Manual Assembly Task. Dans L. Longo & M. C. Leva (Éds), *Human Mental Workload: Models and Applications* (Vol. 1318, pp. 147-174). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62302-9_10

Bläsing, D., Bornewasser, M., & Hinrichsen, S. (2021). Cognitive compatibility in modern manual mixed-model assembly systems. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, *76*(3), 289-302. https://doi.org/10.1007/s41449-021-00296-1

Blessing, L. T. M., & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London : Springer London. https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1

Bobillier-Chaumon, M.-É., & Dubois, M. (2010). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ?: *Le travail humain*, *Vol. 72*(4), 355-382. https://doi.org/10.3917/th.724.0355

Boisseau, P. (2016). *La conception mécanique - 2e éd.* (S.l.) : Dunod. (Google-Books-ID: rnA1DQAAQBAJ).

Bornewasser, M., Bläsing, D., & Hinrichsen, S. (2018). Informatorische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, *72*(4), 264-275. https://doi.org/10.1007/s41449-018-0123-x

Brown, E., & Cairns, P. (2004). A grounded investigation of game immersion. Dans *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1297-1300). Vienna Austria : ACM. https://doi.org/10.1145/985921.986048

Bruce P., B., Putz-Anderson, V., Burt, S. E., Cole, L. L., Fairfield-Estill, C., Fine, L. J., … Gjessing, C. (2020). Musculoskeletal disorders and workplace factors. A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB97141

Brusie, T., Fijal, T., Keller, A., Lauff, C., Barker, K., Schwinck, J., … Guerlain, S. (2015). Usability evaluation of two smart glass systems. Dans *2015 Systems and Information Engineering Design Symposium* (pp. 336-341). https://doi.org/10.1109/SIEDS.2015.7117000

Buckle, P. W., & Jason Devereux, J. (2002). The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics*, *33*(3), 207-217. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(02)00014-5

Cacha, C. A. (1999). *Ergonomics and safety in hand tool design*. (S.l.) : CRC Press.

Caricato, P., Colizzi, L., Gnoni, M. G., Grieco, A., Guerrieri, A., & Lanzilotto, A. (2014). Augmented reality applications in manufacturing: a multi-criteria decision model for performance analysis. *IFAC Proceedings Volumes*, *47*(3), 754-759. https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01947

Chae, D. H., & Kim, J. H. (2005). Risk factors for musculoskeletal symptoms in aviation maintenance technicians. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, *17*(3), 173. https://doi.org/10.35371/kjoem.2005.17.3.173

Chang, J., Jung, K., Kim, W., Moon, S. K., Freivalds, A., Simpson, T. W., & Baik, S. P. (2014). Effects of weight balance on a 3D TV shutter type glasses: Subjective discomfort and physical contact load on the nose. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *44*(6), 801-809. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.10.005

Chen, C., Tian, Z., Li, D., Pang, L., Wang, T., & Hong, J. (2021). Projection-based augmented reality system for assembly guidance and monitoring. *Assembly Automation*, *41*(1), 10-23. https://doi.org/10.1108/AA-02-2019-0028

Chen, F., Zhou, J., Wang, Y., Yu, K., Arshad, S. Z., Khawaji, A., & Conway, D. (2016). *Robust Multimodal Cognitive Load Measurement*. Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-31700-7

Chihara, T., & Seo, A. (2018). Evaluation of physical workload affected by mass and center of mass of head-mounted display. *Applied Ergonomics*, *68*, 204-212. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.11.016

Chopp, J. N., Fischer, S. L., & Dickerson, C. R. (2010). The impact of work configuration, target angle and hand force direction on upper extremity muscle activity during sub-maximal overhead work. *Ergonomics*, *53*(1), 83-91. https://doi.org/10.1080/00140130903323232

Chopra, S., & Maurer, F. (2020). Evaluating User Preferences for Augmented Reality Interactions with the Internet of Things. Dans *Proceedings of the International Conference on Advanced Visual Interfaces* (pp. 1-9). Salerno Italy : ACM. https://doi.org/10.1145/3399715.3399716

CNESST. (2023). Statistiques sur les lésions attribuables aux troubles musculosquelettiques (TMS) en milieu de travail 2019-2022.

CNESST, & IRSST. (2024, février). Sécurité des machines : GUIDE DU PROCESSUS DE L'APPRÉCIATION DU RISQUE.

Danielsson, O., Holm, M., & Syberfeldt, A. (2020a). Augmented reality smart glasses for operators in production: Survey of relevant categories for supporting operators. *Procedia CIRP*, *93*, 1298-1303. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.099

Danielsson, O., Holm, M., & Syberfeldt, A. (2020b). Augmented reality smart glasses in industrial assembly: Current status and future challenges. *Journal of Industrial Information Integration*, *20*, 100175. https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100175

Dar, M., Ahmad, M., & Masood, F. (2018). Ergonomie evaluation by cognitive and physical integration. Dans *2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)* (pp. 1-4). Sukkur, Pakistan : IEEE. https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346376

Dipietro, L., Sabatini, A. M., & Dario, P. (2008). A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, *38*(4), 461-482. https://doi.org/10.1109/TSMCC.2008.923862

DIZIO, P. (1992). Spatial Orientation, Adaptation and Motion Sickness in Real and Virtual Environments. *Presence*, *3*(1), 319-328.

Drascic, D., & Milgram, P. (1996). Perceptual issues in augmented reality. Dans M. T. Bolas, S. S. Fisher, & J. O. Merritt (Éds), (pp. 123-134). Communication présentée au Electronic Imaging: Science & Technology, San Jose, CA. https://doi.org/10.1117/12.237425

Faisal, A. (2017). Computer science: Visionary of virtual reality. *Nature*, *551*(7680), 298-299. https://doi.org/10.1038/551298a

Fajardo Rodriguez, H. A., & Ortiz Mayorga, V. A. (2016). Characterization of Low Back Pain in Pilots and Maintenance Technicians on a Commercial Airline. *Aerospace Medicine and Human Performance*, *87*(9), 795-799. https://doi.org/10.3357/AMHP.4384.2016

Fang, W., Chen, L., Zhang, T., Chen, C., Teng, Z., & Wang, L. (2023). Head-mounted display augmented reality in manufacturing: A systematic review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *83*, 102567. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102567

Fast-Berglund, Å., Fässberg, T., Hellman, F., Davidsson, A., & Stahre, J. (2013). Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, *32*(3), 449-455. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.04.011

Fellmann, M., Robert, S., Büttner, S., Mucha, H., & Röcker, C. (2017). Towards a Framework for Assistance Systems to Support Work Processes in Smart Factories. Dans A. Holzinger, P. Kieseberg, A. M. Tjoa, & E. Weippl (Éds), *Machine Learning and Knowledge Extraction* (Vol. 10410, pp. 59-68). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66808-6_5

Fraga-Lamas, P., Fernandez-Carames, T. M., Blanco-Novoa, O., & Vilar-Montesinos, M. A. (2018). A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard. *IEEE Access*, *6*, 13358-13375. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2808326

Fredrich, H., Dick, M., & Haase, T. (2021). *Zur Passung von Arbeitsanforderungen und digitalen Assistenztechnologien in handwerklichen und industriellen Montageprozessen*. (S.l.) : (s.n.).

Funk, M., & Schmidt, A. (2015). Cognitive Assistance in the Workplace. *IEEE Pervasive Computing*, *14*(3), 53-55. https://doi.org/10.1109/MPRV.2015.53

Gagnon, Y.-C. (2012). *L'étude de cas comme méthode de recherche*. (S.l.) : PUQ. Repéré à https://books.google.com/books?hl=fr&lr=&id=X4dqcj39EEUC&oi=fnd&pg=PR11&dq=+L%27+%C3%A9tude+de+cas+comme+m%C3%A9thode+de+recherche,+2e+%C3%A9dition,+Les+Presses+de+l%27Universit%C3%A9+du+Qu%C3%A9bec,+2012.&ots=s0AHpYfbBh&sig=r3v1C0ZMNam80qRTnp0c8dQbV1U

Gilbert R. (2004). *Analyse et conception de postes de travail*. [Notes miméographiques cours IND 2801], Ecole Polytechnique de Montréal. Manuscrit soumis pour publication.

Gu, W., Yan, S., Xiong, J., Li, Y., Zhang, Q., Li, K., … Wang, H. (2023). Wireless smart gloves with ultra-stable and all-recyclable liquid metal-based sensing fibers for hand gesture recognition. *Chemical Engineering Journal*, *460*, 141777. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141777

Haase, T., Radde, J., Keller, A., Berndt, D., & Dick, M. (2020). Integrated Learning and Assistive Systems for Manual Work in Production - Proposal for a Systematic Approach to Technology Selection and Design. Dans T. Ahram & C. Falcão (Éds), *Advances in Usability, User Experience, Wearable and Assistive Technology* (Vol. 1217, pp. 853-859). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51828-8_113

Habes, D. J., & Grant, K. A. (1997). An electromyographic study of maximum torques and upper extremity muscle activity in simulated screwdriving tasks. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *20*(4), 339-346. https://doi.org/10.1016/S0169-8141(96)00069-8

Haukka, E. (2010). musculoskeletal disorders and psychosocial factors at work. Effects of a participatory ergonomics intervention in a cluster randomized controlled trial.

Heilemann, F., Zimmermann, G., & Münster, P. (2022). Accessible Hands-Free Input Methods for VR Games. Dans K. Miesenberger, G. Kouroupetroglou, K. Mavrou, R. Manduchi, M. Covarrubias Rodriguez, & P. Penáz (Éds), *Computers Helping People with Special Needs* (Vol. 13341, pp. 371-379). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08648-9_43

Hoffman, D. M., Stepien, N. N., & Xiong, W. (2016). The importance of native panel contrast and local dimming density on perceived image quality of high dynamic range displays. *Journal of the Society for Information Display*, *24*(4), 216-228. https://doi.org/10.1002/jsid.416

Hold, P., Erol, S., Reisinger, G., & Sihn, W. (2017). Planning and Evaluation of Digital Assistance Systems. *Procedia Manufacturing*, *9*, 143-150. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.024

Hold, P., & Sihn, W. (2016). Towards a model to identify the need and the economic efficiency of digital assistance systems in cyber-physical assembly systems. Dans *2016 1st International Workshop on Cyber-Physical Production Systems (CPPS)* (pp. 1-4). Vienna, Austria : IEEE. https://doi.org/10.1109/CPPS.2016.7483914

Hollnagel, E. (1997). Cognitive ergonomics: it's all in the mind. *Ergonomics*, *40*(10), 1170-1182. https://doi.org/10.1080/001401397187685

Hollnagel, E. (1998). *Cognitive reliability and error analysis method (CREAM)*. (S.l.) : Elsevier.

Huang, H.-M., Rauch, U., & Liaw, S.-S. (2010). Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach. *Computers & Education*, *55*(3), 1171-1182. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.014

Hudson, S., Matson-Barkat, S., Pallamin, N., & Jegou, G. (2019). With or without you? Interaction and immersion in a virtual reality experience. *Journal of Business Research*, *100*, 459-468. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.10.062

IAN, A., & GALER, R. (1996). Combining physical, physiological and subjective data in the evaluation. *Usability Evaluation In Industry*, 29.

INRS. (2011). Les troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMS-MS) - Brochure - INRS. Repéré à https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%20957

ISO 9241-11. (2019). ISO 9241-11 : 2019 (en) Ergonomie de l'interaction homme-système - Partie 11: Utilisabilité-Définitions et concepts.

ISO 12100. (2010). ISO 12100 : 2010 : Sécurité des machines — Principes généraux de conception — Appréciation du risque et réduction du risque.

Jennett, C., Cox, A. L., Cairns, P., Dhoparee, S., Epps, A., Tijs, T., & Walton, A. (2008). Measuring and defining the experience of immersion in games. *International Journal of Human-Computer Studies*, *66*(9), 641-661. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2008.04.004

Jogulu, U. D., & Pansiri, J. (2011). Mixed methods: a research design for management doctoral dissertations. *Management Research Review*, *34*(6), 687-701. https://doi.org/10.1108/01409171111136211

Johansson, P. E. C., Enofe, M. O., Schwarzkopf, M., Malmsköld, L., Fast-Berglund, Å., & Moestam, L. (2017). Data and Information Handling in Assembly Information Systems – A Current State Analysis. *Procedia Manufacturing*, *11*, 2099-2106. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.335

Johnson, G. I. (1996). The usability checklist approach revisited. *Usability evaluation in industry*, 179-188.

Jordan, P. W., Bruce, T., Weerdmeester, B. A., & McClelland, I. L. (Éds). (1996). *Usability evaluation in industry*. London ; Bristol, Pa : Taylor & Francis.

Kang, H., & Shin, G. (2017). Effects of touch target location on performance and physical demands of computer touchscreen use. *Applied Ergonomics*, *61*, 159-167. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.01.015

Kar, G., Vu, A., Juliá Nehme, B., & Hedge, A. (2015). Effects of Mouse, Trackpad and 3d Motion and Gesture Control on Performance, Posture, and Comfort. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *59*(1), 327-331. https://doi.org/10.1177/1541931215591068

Kemp, P. A., Burnham, B. R., Copley, G. B., & Shim, M. J. (2010). Injuries to Air Force Personnel Associated with Lifting, Handling, and Carrying Objects. *American Journal of Preventive Medicine*, *38*(1), S148-S155. https://doi.org/10.1016/j.amepre.2009.10.011

Khoddammhoammadi, N., Ngô, V. T. M., & Nadeau, S. (2023a). Integrating smart glasses in a hybrid manufacturing system: Towards a better understanding of impacts on productivity, quality and ergonomics/human factors. Trois-Rivières, QC, Canada. Repéré à https://espace2.etsmtl.ca/id/eprint/26729/

Khoddammhoammadi, N., Ngô, V. T. M., & Nadeau, S. (2023b). Integrating smart glasses in a hybrid manufacturing system: Towards a better understanding of impacts on productivity, quality and ergonomics/human factors.

Kim, J. H., Ari, H., Madasu, C., & Hwang, J. (2020). Evaluation of the biomechanical stress in the neck and shoulders during augmented reality interactions. *Applied Ergonomics*, *88*, 103175. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103175

Kim, S., Nussbaum, M. A., & Gabbard, J. L. (2019). Influences of augmented reality head-worn display type and user interface design on performance and usability in simulated warehouse order picking. *Applied Ergonomics*, *74*, 186-193. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.08.026

Kim, Y. M., Bahn, S., & Yun, M. H. (2021). Wearing comfort and perceived heaviness of smart glasses. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *31*(5), 484-495. https://doi.org/10.1002/hfm.20895

Klose, E. M., & Schmidt, L. (2018). A User-Based Comparison of Two Augmented Reality Glasses. Dans *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)* (pp. 1-2). Reutlingen : IEEE. https://doi.org/10.1109/VR.2018.8446175

Knight, J. F., & Baber, C. (2004). Neck muscle activity and perceived pain and discomfort due to variations of head load and posture. *Aviation, space, and environmental medicine*, *75*(2), 123-131.

Knight, J. F., & Baber, C. (2007). Effect of head-mounted displays on posture. *Human factors*, *49*(5), 797-807.

Kosch, T., Kettner, R., Funk, M., & Schmidt, A. (2016). Motioneap – ein system zur effizienzsteigerung und assistenz bei produktionsprozessen in unternehmen auf basis von bewegungserkennung und projektion. Dans *8th VDI / VDE Symposium on Human-Technology Interaction in the Age of Industry, USEWARE 2016, October 6, 2016 - October 7, 2016* (Vol. 2016, pp. 213-220). Dresden, Germany : VDI Verlag GMBH.

Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., & Jørgensen, K. (1987). Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, *18*(3), 233-237. https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90010-X

Lee, L.-H., & Hui, P. (2018). Interaction Methods for Smart Glasses: A Survey. *IEEE Access*, *6*, 28712-28732. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2831081

Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, *161*, 113738. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738

Maciukiewicz, J. M., Cudlip, A. C., Chopp-Hurley, J. N., & Dickerson, C. R. (2016). Effects of overhead work configuration on muscle activity during a simulated drilling task. *Applied Ergonomics*, *53*, 10-16. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.08.005

Mandeville-Gauthier, V., 1987-, & Marchand, D., 1961-. (2012). *Quantification des paramètres biomécaniques qui affectent le système main-bras lors de la simulation de la tenue d'outils exerçant différentes vibrations et moments de force*. Université du Québec à Montréal, Montréal. Repéré à WorldCat.

Mark, B. G., Rauch, E., & Matt, D. T. (2022). Systematic selection methodology for worker assistance systems in manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, *166*, 107982. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107982

Mengoni, M., Ceccacci, S., Generosi, A., & Leopardi, A. (2018). Spatial Augmented Reality: an application for human work in smart manufacturing environment. *Procedia Manufacturing*, *17*, 476-483. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.072

Mentler, T., Wolters, C., & Herczeg, M. (2015). Use cases and usability challenges for head-mounted displays in healthcare. *Current Directions in Biomedical Engineering*, *1*(1), 534-537. https://doi.org/10.1515/cdbme-2015-0127

Merazzi, J., & Friedel, A. (2017). Einteilung und Bewertung von Montageassistenzsystemen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, *112*(6), 413-416. https://doi.org/10.3139/104.111740

Ministère de la santé et des services sociaux. (2016). Troubles musculosquelettiques liés au travail - Statistiques de santé et de bien être selon le sexe - Tout le Québec - Professionnels de la santé - MSSS. Repéré à https://www.msss.gouv.qc.ca/professionnels/statistiques-donnees-sante-bien-etre/statistiques-de-sante-et-de-bien-etre-selon-le-sexe-volet-national/troubles-musculosquelettiques-lies-au-travail/

Mishra, P., Sharma, N. Kr., & Hakani, R. (2023). Recent Advancements in the Augmentation of Interactive Gloves for Quantifying Applied Effort. Dans *2023 4th International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)* (pp. 1310-1316). Coimbatore, India : IEEE. https://doi.org/10.1109/ICESC57686.2023.10193129

Monteiro, P., Gonçalves, G., Peixoto, B., Melo, M., & Bessa, M. (2023). Evaluation of Hands-Free VR Interaction Methods During a Fitts' Task: Efficiency and Effectiveness. *IEEE Access*, *11*, 70898-70911. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3293057

Murray, M., Lange, B., Chreiteh, S. S., Olsen, H. B., Nørnberg, B. R., Boyle, E., … Sjøgaard, G. (2016). Neck and shoulder muscle activity and posture among helicopter pilots and crew-members during military helicopter flight. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, *27*, 10-17. https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2015.12.009

Nadeau, S. (2019). Incidence du numérique sur le travail.

Nadeau, S., & Arteau, J. (2005). vision. Ecole de technologie supérieure.

Naeini, A. M., & Nadeau, S. (2022). Application of FRAM to perform Risk Analysis of the Introduction of a Data Glove to Assembly Tasks. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, *74*, 102285. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102285

Namnakani, O., Abdrabou, Y., Grizou, J., Esteves, A., & Khamis, M. (2023). Comparing Dwell time, Pursuits and Gaze Gestures for Gaze Interaction on Handheld Mobile Devices. Dans *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-17). Hamburg Germany : ACM. https://doi.org/10.1145/3544548.3580871

Nichols, S. (1999). Physical ergonomics of virtual environment use. *Applied Ergonomics*, *30*(1), 79-90.

Nik Ahmad, N. A., & Hasni, N. S. (2021). ISO 9241-11 and SUS Measurement for Usability Assessment of Dropshipping Sales Management Application. Dans *2021 10th International Conference on Software and Computer Applications* (pp. 70-74). Kuala Lumpur Malaysia : ACM. https://doi.org/10.1145/3457784.3457794

Nogueira, H. C., Diniz, A. C. P., Barbieri, D. F., Padula, R. S., Carregaro, R. L., & de Oliveira, A. B. (2012). Musculoskeletal disorders and psychosocial risk factors among workers of the aircraft maintenance industry. *Work*, *41*, 4801-4807. https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0767-4801

Panariello, D., Grazioso, S., Caporaso, T., Palomba, A., Di Gironimo, G., & Lanzotti, A. (2022). Biomechanical analysis of the upper body during overhead industrial tasks using electromyography and motion capture integrated with digital human models. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, *16*(2), 733-752. https://doi.org/10.1007/s12008-022-00862-9

Peillard, E., Itoh, Y., Moreau, G., Normand, J.-M., Lécuyer, A., & Argelaguet, F. (2020). Can Retinal Projection Displays Improve Spatial Perception in Augmented Reality? Dans *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)* (pp. 80-89). https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00028

Penumudi, S. A., Kuppam, V. A., Kim, J. H., & Hwang, J. (2020). The effects of target location on musculoskeletal load, task performance, and subjective discomfort during virtual reality interactions. *Applied Ergonomics*, *84*, 103010. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.103010

Petzoldt, C., Keiser, D., Beinke, T., & Freitag, M. (2020). Requirements for an Incentive-Based Assistance System for Manual Assembly. Dans M. Freitag, H.-D. Haasis, H. Kotzab, & J. Pannek (Éds), *Dynamics in Logistics* (pp. 541-553). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44783-0_50

Pistolesi, F., Baldassini, M., & Lazzerini, B. (2024). A human-centric system combining smartwatch and LiDAR data to assess the risk of musculoskeletal disorders and improve ergonomics of Industry 5.0 manufacturing workers. *Computers in Industry*, *155*, 104042. https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104042

Pokorni, B., & Constantinescu, C. (2021). Design and Configuration of Digital Assistance Systems in Manual Assembly of Variant-rich Products based on Customer Journey Mapping. *Procedia CIRP*, *104*, 1777-1782. https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.299

Pose-Díez-de-la-Lastra, A., Moreta-Martinez, R., García-Sevilla, M., García-Mato, D., Calvo-Haro, J. A., Mediavilla-Santos, L., … Pascau, J. (2022). HoloLens 1 vs. HoloLens 2: Improvements in the New Model for Orthopedic Oncological Interventions. *Sensors*, *22*(13), 4915. https://doi.org/10.3390/s22134915

Qin, Y., Bloomquist, E., Bulbul, T., Gabbard, J., & Tanous, K. (2021). Impact of information display on worker performance for wood frame wall assembly using AR HMD under different task conditions. *Advanced Engineering Informatics*, *50*, 101423. https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101423

Rasoulivalajoozi, M., Rasouli, M., Cucuzzella, C., & Kwok, T. H. (2023). Prevalence of musculoskeletal disorders and postural analysis of beekeepers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *98*, 103504. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103504

Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality. *Computers in Human Behavior*, *133*, 107289. https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289

Rivest, R. (2020). HEC MONTRÉAL Techniques de simulation pour la recherche sur le perfectionnement de la méthode AHP Par Robin Rivest Sciences de la décision (Option Science des données et analytique d'affaires).

Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., & Fast-Berglund, Å. (2016). The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. Dans I. Nääs, O. Vendrametto, J. Mendes Reis, R. F. Gonçalves, M. T. Silva, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (Éds), *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World* (Vol. 488, pp. 677-686). Cham : Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_80

Romero, D., Stahre, J., & Taisch, M. (2020). The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 106128. https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106128

Rouleau, A. (2010). Évaluation de stratégies visant la réduction des contraintes physiques pour les membres supérieurs associées au boulonnage à la clé à chocs pneumatique sur le plan horizontal et vertical dans les secteurs des services à l'automobile/mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en kinanthropologie par Alexandre Rouleau;[directeur de recherche, Denis Marchand].

Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, *102*, 251-318.

Salvendy, G., & Karwowski, W. (Éds). (2021). *HANDBOOK OF HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS* (1re éd.). (S.l.) : Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119636113

Shin, G., & Zhu, X. (2011). User discomfort, work posture and muscle activity while using a touchscreen in a desktop PC setting. *Ergonomics*, *54*(8), 733-744. https://doi.org/10.1080/00140139.2011.592604

Shneiderman, B., Plaisant, C., Cohen, M., Jacobs, S., Elmqvist, N., & Diakopoulos, N. (2016). *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction*. (S.l.) : Pearson.

Sperling, L., Dahlman, S., Wikström, L., Kilbom, Å., & Kadefors, R. (1993). A cube model for the classification of work with hand tools and the formulation of functional requirements. *Applied Ergonomics*, *24*(3), 212-220. https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90009-X

Stecken, J., Linsinger, M., Sudhoff, M., & Kuhlenkötter, B. (2019). Didactic Concept for Increasing Acceptance of Consistent Data Standards Using the Example of Assistance Systems in Assembly. *Procedia Manufacturing*, *31*, 277-282. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.044

Strasser, H., & Bullinger, H. J. (2007). A systematic approach for the analysis and ergonomic design of hand-held tools and control actuators–visualized by some real-life examples. *Assessment of the Ergonomic Quality of Hand-Held Tools and Computer Input Devices*, *1*, 1-22.

Syberfeldt, A., Danielsson, O., & Gustavsson, P. (2017). Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products. *IEEE Access*, *5*, 9118-9130. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2703952

Thomas, H. R. (2000). Schedule Acceleration, Work Flow, and Labor Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management*, *126*(4), 261-267. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2000)126:4(261)

Thuresson, M., Linder, J., & Harms-Ringdahl, K. (2003). Neck muscle activity in helicopter pilots: effect of position and helmet-mounted equipment. *Aviation, space, and environmental medicine*, *74*(5), 527-532.

Triantaphyllou, E. (1999). Reduction of pairwise comparisons in decision making via a duality approach. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, *8*(6), 299-310. https://doi.org/10.1002/1099-1360(199911)8:6<299::AID-MCDA253>3.0.CO;2-7

Unger, M., Heinrich, S., Rick, M., Halama, D., & Chalopin, C. (2022). Hologram accuracy evaluation of HoloLens 2 for thermal imaging in medical applications. *Current Directions in Biomedical Engineering*, *8*(2), 193-196. https://doi.org/10.1515/cdbme-2022-1050

US Departement of labor.Bureau of Labor Statistics. (2015). Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2014.

Vidal-Balea, A., Blanco-Novoa, O., Fraga-Lamas, P., Vilar-Montesinos, M., & Fernández-Caramés, T. M. (2020). Creating Collaborative Augmented Reality Experiences for Industry 4.0 Training and Assistance Applications: Performance Evaluation in the Shipyard of the Future. *Applied Sciences*, *10*(24), 9073. https://doi.org/10.3390/app10249073

Wærsted, M., Koch, M., & Veiersted, K. B. (2020). Work above shoulder level and shoulder complaints: a systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, *93*(8), 925-954. https://doi.org/10.1007/s00420-020-01551-4

Wang, B., Zheng, L., Wang, Y., Fang, W., & Wang, L. (2024). Towards the industry 5.0 frontier: Review and prospect of XR in product assembly. *Journal of Manufacturing Systems*, *74*, 777-811. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.002

Wang, C.-H., Hsiao, C.-Y., Tai, A.-T., & Wang, M.-J. J. (2023). Usability evaluation of augmented reality visualizations on an optical see-through head-mounted display for assisting machine operations. *Applied Ergonomics*, *113*, 104112. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2023.104112

Wang, Y., Yang, T., Ni, D., Cheng, D., & Wang, Y. (2023). Design of retinal projection near-eye display with extended eyebox based on freeform holographic elements. Dans *AOPC 2022: Optical Sensing, Imaging, and Display Technology* (Vol. 12557, pp. 617-622). SPIE. https://doi.org/10.1117/12.2651772

Wang, Z. B., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2013). Augmented reality aided interactive manual assembly design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *69*(5-8), 1311-1321. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5091-x

Wang, Z., Wang, H., Yu, H., & Lu, F. (2021). Interaction With Gaze, Gesture, and Speech in a Flexibly Configurable Augmented Reality System. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *51*(5), 524-534. https://doi.org/10.1109/THMS.2021.3097973

White, J., Schmidt, D. C., & Golparvar-Fard, M. (2014). Applications of Augmented Reality [Scanning the Issue]. *Proceedings of the IEEE*, *102*(2), 120-123. https://doi.org/10.1109/JPROC.2013.2295873

Xiao, H., Duan, Y., & Zhang, Z. (2018). Mobile 3D assembly process information construction and transfer to the assembly station of complex products. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *31*(1), 11-26. https://doi.org/10.1080/0951192X.2017.1356470

Young, M. S., Brookhuis, K. A., Wickens, C. D., & Hancock, P. A. (2015). State of science: mental workload in ergonomics. *Ergonomics*, *58*(1), 1-17. https://doi.org/10.1080/00140139.2014.956151