



HAL
open science

Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation

Fabien Bernard

► **To cite this version:**

Fabien Bernard. Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2019. Français. NNT : 2019UBFCA015 . tel-02498222

HAL Id: tel-02498222

<https://theses.hal.science/tel-02498222v1>

Submitted on 4 Mar 2020

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

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



THESE DE DOCTORAT DE L'ETABLISSEMENT UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE

PREPAREE A L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD (UTBM)

Ecole doctorale n°37

Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques (SPIM)

Doctorat en Sciences pour l'Ingénieur

Par

M. BERNARD Fabien

Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation

Thèse présentée et soutenue à Montbéliard, le 6 novembre 2019

Composition du Jury :

AOUSSAT Améziane
BUISINE Stéphanie
GARRIGOU Alain
PAQUIN Raphael
RICHIR Simon
SAGOT Jean-Claude
ZARE Mohsen

Professeur des Universités, Arts et Métiers, Paris
Professeur HDR, CESI, Paris-Nanterre
Professeur des Universités, Université de Bordeaux
Expert, responsable de l'équipe maintenabilité, Airbus Helicopters
Professeur des Universités, Arts et Métiers, Angers
Professeur des Universités, UBFC, UTBM, Belfort
Enseignant-chercheur, UBFC, UTBM, Belfort

Président
Examineur
Rapporteur
Invité
Rapporteur
Directeur de thèse
Co-encadrant

1. REMERCIEMENTS

Juin 2019, je pose le point final d'un parcours de recherche, commencé 5 années plus tôt, lorsque je proposais un sujet de thèse à mon tuteur de stage de fin d'études au sein d'Airbus Helicopters. L'engrenage était lancé et, en février 2016, après 2 ans d'un parcours complexe pour monter le dossier de candidature, je commençais ma thèse de doctorat. Rempli de passion pour le monde de l'aviation, et de motivation pour contribuer à son évolution, je rejoignais l'aéroport de Marignane, berceau de bien des innovations aéronautiques. Mais ce parcours n'a eu de sens que par les rencontres, les collaborations que j'ai pu faire, et les échanges nourris qui en sont nés. Je souhaite ici remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet qui reste avant tout, un travail d'équipe.

À Monsieur Alain Garrigou, Professeur des Universités au département Hygiène, Sécurité et Environnement (HSE) de l'Université de Bordeaux, membre du centre de recherche INSERM, à Monsieur Simon Richir, Professeur des Universités aux Arts et Métiers ParisTech d'Angers, Responsable de l'Équipe Présence et Innovation (PI) pour avoir accepté de juger ce travail et de me faire l'honneur d'en être les rapporteurs.

A Madame Stéphanie Buisine, Professeur HDR au CESI de Paris Nanterre et à Monsieur Améziane Aoussat, Professeur des Universités aux Arts et Métiers ParisTech, Directeur du Laboratoire Conception de Produits et Innovation (LCPI) pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse et d'en être les examinateurs.

À mon co-encadrant de thèse Monsieur Mohsen Zare, enseignant-chercheur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UBFC – UTBM) pour le partage de son savoir, nos nombreux échanges et conseils qui ont été précieux pour avancer.

À mon directeur de thèse Monsieur Jean-Claude Sagot, Professeur des Universités de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UBFC – UTBM), Responsable de l'équipe ERgonomie et CONception des Systèmes (ERCOS) pour son soutien scientifique et technique pendant les cinq dernières années et plus particulièrement pendant les trois années de thèse et l'aventure qu'elle représente.

À Monsieur Raphael Paquin, responsable de l'équipe maintenabilité d'Airbus Helicopters. Son soutien depuis 2014, ses conseils et sa bienveillance ont largement contribué à ce travail de recherche. Un immense merci à toi.

À Monsieur Kévin Dos Santos, responsable du département ETXOV pour avoir contribué à la bonne suite de mes travaux et pour m'avoir permis de poursuivre l'aventure au sein de son équipe.

Remerciements

À Monsieur Jean-Luc Avy, responsable du département ETXO, qui a su donner une dynamique à la discipline du facteur humain au sein de la maintenabilité, et même bien au-delà, touchant une bonne partie du bureau d'études.

À l'ensemble de l'équipe maintenabilité avec qui j'ai passé la majeure partie de mon temps. Leurs conseils et leurs contributions dans les expérimentations menées ont grandement aidé à la bonne conduite de ce travail. Leur bonne humeur et la cohésion de l'équipe ont aussi permis de rendre ce travail agréable.

À toute l'équipe ERCOS de l'UTBM, et plus particulièrement à Morad M., Antoine V. et Florence B. qui ont contribué à ce travail. A chacun, je souhaite adresser mes sincères remerciements. J'adresse également un merci amical à Morgane R. et Nicolas V. pour leurs conseils, ainsi qu'à Hugues B., Thierry R., Sébastien C., Régis V., Bernard M., Gérard T. et Thomas P. pour le partage de leur savoir.

To Stefanie Gutschmidt from the University of Canterbury in New Zealand, my motivation for the field of research was certainly born in 2013. I address my deeply gratitude to Steeve B. and Kerri-Anne R. for their advice, help and the inspiration, that they gave me, for the rest of my life. You are still in my heart.

À mes proches, à mes amis et à tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé : Marius B., Konstanca N., Joffrey B., Yohann G., Olivier A., Maxime D., Jean-Marc B., Simon F., Graham W., Maxime L. et Jérôme M. J'ai aussi une pensée particulière pour Constant C., l'Estonie et tous nos voyages resteront des souvenirs inoubliables ! Pour Pierre L., avec qui partager notre passion pour l'aéronautique (et accessoirement pour la recherche...) est toujours un plaisir. N'oublie pas, pas de spirale en thermique pure...

A Margaux, qui a su m'écouter, me comprendre et être patiente durant ces trois dernières années. Les absences, les soirées et les weekends passés à travailler ne seront qu'un lointain souvenir. Le chemin parcouru est aussi le tien, depuis trois ans, et pour encore longtemps, je l'espère.

A mes parents, Brigitte et Alain et à mon frère, Pierre-Alexandre. Leur soutien de toujours, leurs conseils, leur amour m'ont permis, à chaque instant, de me dépasser. Sans vous, le travail accompli n'aurait jamais vu le jour. Il vous est entièrement dédié.

« Fais de ta vie un rêve, et d'un rêve, une réalité. »

Antoine de Saint-Exupéry

2. TABLE DES MATIERES

1.	REMERCIEMENTS.....	3
2.	TABLE DES MATIERES.....	9
	INTRODUCTION GENERALE	15
1.	Introduction générale	18
2.	Cadre du travail de recherche	20
2.1.	<i>Le laboratoire d'accueil.....</i>	<i>20</i>
2.2.	<i>L'entreprise : Airbus (Helicopters).....</i>	<i>23</i>
2.2.1.	Le contexte industriel	23
2.2.2.	L'hélicoptère	24
3.	Positionnement, objectifs et contributions.....	26
4.	Organisation du manuscrit	30
	CHAPITRE I. LE FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE	35
1.	Introduction.....	38
2.	Etat de l'art.....	38
2.1.	<i>La maintenance aéronautique.....</i>	<i>38</i>
2.1.1.	Définitions générales	38
2.1.2.	Concepts généraux	39
2.1.3.	Organisation de la maintenance aéronautique	41
2.1.4.	Maintenance & maintenabilité	45
2.2.	<i>La maintenabilité aéronautique</i>	<i>46</i>
2.2.1.	Du Design For Assembly (DFA) à la maintenabilité.....	46
2.2.2.	Design For Maintainability (DFMaint).....	47
2.3.	<i>Le facteur humain en maintenabilité.....</i>	<i>48</i>
2.3.1.	Généralités.....	48
2.3.2.	Les indicateurs de maintenance: vecteurs d'informations pour la maintenabilité et support de l'approche du facteur humain.....	52
2.4.	<i>Synthèse de l'état de l'art</i>	<i>57</i>
3.	Première expérimentation : état des pratiques	60
3.1.	<i>Contributions et hypothèses de recherche associées.....</i>	<i>60</i>
3.2.	<i>Méthodes et techniques</i>	<i>61</i>
3.2.1.	Questionnaire semi-directif	61
3.2.2.	Analyse de documents techniques	68
3.3.	<i>Présentation des résultats</i>	<i>69</i>

Table des matières

3.3.1.	Degré de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité	70
3.3.2.	Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception	77
4.	Discussion	79
4.1.	<i>Degré de connaissance en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité</i>	<i>80</i>
4.2.	<i>Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception</i>	<i>82</i>
4.3.	<i>Synthèse de la discussion</i>	<i>84</i>
5.	Synthèse du chapitre et perspectives	86
5.1.	<i>Synthèse du chapitre</i>	<i>86</i>
5.2.	<i>Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité.....</i>	<i>87</i>
	CHAPITRE II. LES OUTILS DE SIMULATION POUR MIEUX INTEGRER LE FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE	91
1.	Introduction.....	94
2.	Etat de l'art.....	94
2.1.	<i>Généralité sur la simulation.....</i>	<i>94</i>
2.2.	<i>Les outils de simulation en maintenabilité</i>	<i>97</i>
2.2.1.	Modeleur et mannequin numérique	98
2.2.2.	Réalité virtuelle	100
2.2.3.	La maquette physique	106
2.3.	<i>Synthèse de l'état de l'art</i>	<i>108</i>
3.	Seconde expérimentation.....	110
3.1.	<i>Contributions et hypothèses de recherche associées.....</i>	<i>110</i>
3.2.	<i>Méthodes et techniques</i>	<i>111</i>
3.2.1.	Zone d'étude.....	111
3.2.2.	Tâches sélectionnées	112
3.2.3.	Dispositifs des outils de simulation.....	113
3.2.3.1.	Mannequin numérique.....	113
3.2.3.2.	Réalité virtuelle.....	113
3.2.3.3.	Maquette physique	114
3.2.4.	Participants et organisation de l'expérimentation	116
3.2.5.	Indicateurs ergonomiques et outils associés analysés	118
3.3.	<i>Présentation des résultats</i>	<i>120</i>
4.	Discussion	125
5.	Synthèse de la discussion	131
6.	Synthèse et perspectives	132
6.1.	<i>Synthèse du chapitre</i>	<i>132</i>
6.2.	<i>Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité.....</i>	<i>133</i>

CHAPITRE III. PROPOSITION D'UNE DEMARCHE D'INTEGRATION DU FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE AERONAUTIQUE		137
1.	Introduction.....	140
2.	Le modèle conceptuel.....	141
3.	La démarche d'analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité (PEAM)	146
3.1.	<i>Déploiement de la démarche PEAM</i>	<i>146</i>
3.1.1.	Objectif	146
3.1.2.	Méthodes et techniques	146
3.1.3.	Résultats et discussion	148
3.2.	<i>Pré-sélection des outils de simulation.....</i>	<i>151</i>
3.2.1.	Objectif	151
3.2.2.	Méthodes et techniques	151
3.2.3.	Résultats et discussion	155
3.3.	<i>Choix de l'outil de simulation.....</i>	<i>157</i>
3.3.1.	Objectif	157
3.3.2.	Méthodes et techniques	157
3.3.3.	Résultats et discussion	159
3.4.	<i>Protocole d'usage des outils de simulation pour réaliser des études de facteur humain</i>	<i>161</i>
3.4.1.	Objectif	161
3.4.2.	Méthodes et techniques	161
3.4.3.	Résultats et discussion	164
3.5.	<i>Analyse du facteur humain</i>	<i>165</i>
3.5.1.	Objectif	165
3.5.2.	Méthodes et techniques	166
3.5.2.1.	Analyse avec opérateur réel.....	166
3.5.2.2.	Analyse avec et sans opérateur réel.....	168
3.5.2.3.	Analyse globale du facteur humain	171
3.5.3.	Résultats et discussion	172
4.	Discussion sur le processus général de la démarche PEAM	176
5.	Synthèse du chapitre et perspectives	181
5.1.	<i>Synthèse du chapitre</i>	<i>181</i>
5.2.	<i>Perspectives pour favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité</i>	<i>182</i>
CHAPITRE IV. VALIDATION DE LA DEMARCHE PEAM		185
1.	Introduction.....	188
1.1.	<i>La validation d'une démarche</i>	<i>189</i>
1.2.	<i>Méthodes et outils de validation d'une démarche</i>	<i>190</i>
2.	Troisième expérimentation	191
2.1.	<i>Contributions et hypothèses de recherche associées.....</i>	<i>191</i>

Table des matières

2.2.	<i>Méthodes et techniques</i>	192
2.2.1.	Contexte de l'approche expérimentale	192
2.2.2.	Déploiement de l'approche expérimentale	194
2.3.	<i>Présentations des résultats</i>	196
2.3.1.	Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM	197
2.3.2.	Questionnaire sur le retour d'expériences de la démarche PEAM	202
3.	Discussion	205
3.1.	<i>Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM</i>	206
3.2.	<i>Questionnaire sur le retour d'expériences de la démarche PEAM</i>	209
4.	Synthèse de la discussion	212
5.	Conclusion et synthèse du chapitre	213
	CHAPITRE V. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES	217
1.	Discussion générale	220
1.1.	<i>Comprendre l'approche facteur humain en maintenabilité</i>	221
1.2.	<i>Les outils de simulation supports de l'approche facteur humain en maintenabilité</i>	223
1.3.	<i>Développement d'une démarche d'aide à l'analyse ergonomique pour non spécialiste en ergonomie</i> 227	
1.4.	<i>Validation de la démarche PEAM</i>	231
1.5.	<i>Synthèse et limites</i>	234
2.	Perspectives de recherche	237
2.1.	<i>Etendre notre démarche à tous les départements du bureau d'études</i>	237
2.2.	<i>Etendre l'analyse à d'autres outils de simulation</i>	239
2.3.	<i>Etendre notre démarche aux erreurs humaines</i>	242
	BIBLIOGRAPHIE	245
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	269
	TABLE DES TABLEAUX	275
	LISTE DES PUBLICATIONS	279
	ANNEXE	281
	<i>Annexe 1 : Questionnaire soumis aux acteurs-métiers du département maintenabilité de l'entreprise pilote</i> 281	
	<i>Annexe 2 : Questionnaire préliminaire aux observations de terrain</i>	286
	<i>Annexe 3 : Fiche pratique résumant la démarche PEAM</i>	287

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

1.	Introduction générale	18
2.	Cadre du travail de recherche	20
2.1.	<i>Le laboratoire d'accueil.....</i>	<i>20</i>
2.2.	<i>L'entreprise : Airbus (Helicopters).....</i>	<i>23</i>
2.2.1.	Le contexte industriel	23
2.2.2.	L'hélicoptère	24
3.	Positionnement, objectifs et contributions.....	26
4.	Organisation du manuscrit	30

1. Introduction générale

L'aéronautique est un domaine technique et scientifique en perpétuelle évolution depuis les premiers vols dans les années 1900 et les deux guerres mondiales qui ont apporté des améliorations majeures, qu'elles soient d'ordre technologiques, humaines ou encore organisationnelles. La fiabilité technique et la sécurité des passagers a notamment été une des premières préoccupations des concepteurs au vu de la croissance des accidents aériens (Toulouse, 1981). Les accidents ont toujours été analysés attentivement afin d'en comprendre les causes et de proposer des solutions pour en réduire le nombre (Reason, 1990). Les concepteurs ont d'abord focalisé leurs efforts sur les améliorations techniques avant de prendre conscience que la majeure partie des accidents aériens mettait également très souvent en cause le facteur humain, en l'occurrence le pilote, voire les concepteurs. Ces accidents sont souvent dûs à un manque de formations et de connaissances, d'où l'expression souvent utilisée dans la littérature, à bon escient ou non, « erreur humaine », qui a fait l'objet de nombreux travaux (Rasmussen, 1982 ; Leplat, 1985 ; Reason, 1990 ; Shappell & Wiegmann, 2001). L'amélioration des méthodes d'analyses des accidents a néanmoins mis en évidence que l'activité de pilotage ne représentait pas la seule et unique cause des dites « erreurs humaines ». En effet, l'activité de maintenance représente aussi un pourcentage non négligeable à l'origine de ces incidents, voire accidents. On considère aujourd'hui que les accidents dus aux erreurs de maintenance représentent en moyenne 12% (Hobbs, 2000) avec une tendance plus forte sur les hélicoptères que sur les avions. De ce constat, deux courants de pensées scientifiques principaux ont vu le jour, l'un concernant les erreurs humaines en maintenance (Shanmugam & Paul Robert, 2015) et l'autre s'interrogeant plus spécifiquement sur les conditions de travail des opérateurs de maintenance (Chang et al., 2010), notamment les enjeux en termes de sécurité et de santé, qui peuvent impacter la qualité de la maintenance et donc la fiabilité du système homme-machine. Nos travaux conduits chez un constructeur d'hélicoptères, se situent plus spécifiquement dans le deuxième courant scientifique. En effet, deux raisons majeures nous poussent à mieux comprendre et à mieux étudier l'activité des opérateurs de maintenance. La première est juridique, puisque depuis 2012, l'employeur a l'obligation légale de mettre en œuvre des actions de prévention des risques professionnels et de la pénibilité au travail (Code du travail - Article L4121-1). La pénibilité au travail se définit par une exposition à un ou plusieurs facteurs de risques professionnels liés à des contraintes physiques marquées, un environnement physique agressif ou à certains rythmes de travail, susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur la santé (Code du travail, article L4121-3-1). La deuxième raison touche le retour d'expériences du terrain, notamment l'organisation de la maintenance qui est reconnue pour induire une activité de travail pénible, voire très pénible. Rappelons, en accord avec les travaux de Kinnison (2004), pour être fiable et disponible, un hélicoptère doit être maintenu en bon état tout au long de sa vie et ainsi assurer la fiabilité et la qualité pour lequel il a été conçu initialement. Cela implique une activité de maintenance très régulière, qu'elle soit planifiée ou inopinée lorsqu'une panne survient, sur des tâches de maintenance très variées. Afin de préserver durablement la performance des machines et la sécurité des personnes, la maintenance est donc devenue une activité de service qui demande une exigence et des compétences particulières de la part des opérateurs de maintenance spécialisés. Ces exigences, aussi indispensables que vitales, ne peuvent être conduites sans l'Homme qui est au cœur du processus de maintenance, tant en terme de prises de décisions que d'actions. Or, inutile de

rappeler que chaque individu est différent et ce dans toutes ses caractéristiques, qu'elles soient physiques (postures, efforts, anthropométrie...), physiologiques (rythme cardiaque, thermorégulation...), cognitives (charge mentale, stress, bien-être...), voire sociales (IEA, 2000). Les industriels sont bien conscients de ces exigences et essaient d'anticiper l'activité de maintenance pour mieux la concevoir au sein d'un département appelé maintenabilité. Plus particulièrement, l'anticipation passe par la simulation de l'activité de maintenance en bureau d'études. Cependant le constat des pratiques actuelles fait apparaître la difficulté, dans un processus de conception, de préserver le bon compromis entre critères mécaniques et exigences ergonomiques (Broberg, 2007).

Ainsi, l'enjeu de nos travaux est d'étudier comment le facteur humain, approché à travers l'ergonomie, même si ce n'est pas la seule discipline à s'intéresser au facteur humain, est considéré, étudié et exploité en bureau d'études dédié à la maintenabilité. Plus particulièrement, comment l'activité de travail des opérateurs de maintenance, en termes de santé, de sécurité et d'efficacité, est conçue et anticipée dans un département composé principalement d'ingénieurs et de techniciens spécialisés en mécanique et en maintenabilité. Des outils pouvant les aider existent et sont déjà utilisés tels que les outils de simulation numériques et physiques à travers les mannequins numériques, les technologies de réalité virtuelle ou encore les maquettes physiques. En effet, ces outils permettent d'étudier aussi bien le design d'un produit que son ergonomie, au sens interactions homme-machine. Or, ce dernier point, qui traite de l'usage d'un produit en relation avec le facteur humain n'est que très peu étudié en bureau d'études, et encore plus si cela touche la maintenabilité, en accord avec les travaux de nombreux auteurs (Sagot, 2003 ; Broberg, 2007 ; Craig et al., 2009). L'absence de démarche en ergonomie dans les bureaux d'études a pour conséquences de dégrader les conditions de vie au travail, au sens pénibilité, pour les opérateurs, et en particulier pour les opérateurs de maintenance.

L'objectif général est donc d'essayer d'apporter une solution permettant à chaque acteur-métier en bureau d'études de pouvoir réaliser des analyses de maintenabilité avec une approche facteur humain objective afin de mieux articuler les exigences ergonomiques avec les exigences techniques sur l'ensemble du processus de conception, là où tout est encore possible en termes d'imagination, de créativité et d'innovation. Cette approche aura pour finalité d'apporter une meilleure compréhension de la future activité des opérateurs de maintenance et donc de proposer des solutions cohérentes en bureau d'études. Cette approche est aussi celle qui est étudiée au sein de l'équipe Ergonomie et Conception des Systèmes (ERCOS), notamment sur le développement de connaissances, de méthodes et d'outils pour une meilleure prise en compte du facteur humain dans la conception de produit/système.

Il s'agira dans un premier temps de réaliser une étude exploratoire du département maintenabilité du constructeur européen d'hélicoptères « Airbus Helicopters » afin d'en comprendre ses pratiques, d'un point de vue macroscopique avec son organisation générale sur l'ensemble du processus de conception ainsi que d'un point de vue microscopique avec les méthodes et outils déployés par chaque ingénieur et technicien dans chacune des phases d'étude.

Dans un deuxième temps nous analyserons la capacité et l'efficacité de chaque outil actuellement disponible au sein du département, outils de simulation majoritairement, qu'ils soient numériques

ou physiques, pour mieux comprendre les analyses de maintenabilité qui sont ou non conduites avec une approche tenant compte du facteur humain dans la conception des tâches de maintenance.

Dans un troisième temps, fort des résultats et des constats issus des deux premières parties, nous nous proposerons de développer une démarche dédiée à l'ensemble des acteurs-métiers du département maintenabilité afin qu'ils exploitent encore mieux les outils de simulation actuellement disponibles dans leur département dans le but de mieux prendre en compte le facteur humain pour améliorer la santé et la sécurité des opérateurs de maintenance.

Nous analyserons ensuite cette nouvelle démarche à partir de plusieurs projets industriels concrets mobilisant plusieurs acteurs-métiers du département concerné. Nous concluons enfin cette recherche par des perspectives à courts et moyens termes qui pourront faire suite à nos travaux.

2. Cadre du travail de recherche

Nos travaux de recherche ont été conduits dans le cadre d'une thèse de doctorat sous convention CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) au sein du pôle de recherche Ergonomie et Conception des Systèmes (ERCOS) du laboratoire ELLIADD (Editions, Langages, Littératures, Informatiques, Arts, Didactiques, Discours, E.A. 4661) de l'Université de Bourgogne-Franche-Comté (UBFC). Ces travaux ont été conduits en collaboration et au sein de l'entreprise Airbus (entité « Hélicoptère»), plus précisément au sein du département « Maintenabilité ». La répartition du temps de travail était de 85% en entreprise et 15% en laboratoire pour le suivi scientifique de nos travaux. Ces deux entités sont présentées dans le paragraphe qui suit.

2.1. Le laboratoire d'accueil

Nos travaux de recherche ont été conduits au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), faisant partie de l'Université de Bourgogne-Franche-Comté (UBFC), et plus spécifiquement au sein du Pôle de recherche ERgonomie et CONception des Systèmes (ERCOS) du laboratoire ELLIADD (E.A. 4661). Les recherches conduites au sein de ce pôle s'articulent autour d'un seul et même axe de recherche intitulé « Développement de connaissances, de méthodes et d'outils pour une conception de produits, de systèmes techniques centrés sur l'Homme », et se déclinent à travers deux programmes complémentaires, à savoir :

- Programme 1 : « Développement de connaissances sur le fonctionnement humain à des fins de conception centrée sur l'utilisateur/opérateur » ;
- Programme 2 : « Développement de méthodes et d'outils favorisant la conception collaborative produit/usage/service ».

Notre recherche est intimement liée à ces deux programmes. En effet, le Pôle de recherche ERCOS est spécialisé dans l'étude et l'identification des caractéristiques, des besoins et des attentes des utilisateurs à des fins de conception collaborative et de développement de produits nouveaux centrés sur l'Homme (Gomes, 1999; Zwolinski, 1999; Sagot et al., 2003; Chitescu et al., 2003; Chitescu, 2005; Mahdjoub, 2007; Fenix, 2008; Mahdjoub et al., 2008; Guerlesquin, 2012; Bazzaro et al., 2012; Charrier et al., 2014). Le Pôle ERCOS assoit ainsi son expertise dans la conception centrée sur l'Homme en tant qu'utilisateur pour un produit de grande diffusion (Sagot et al., 2003; Chitescu et al., 2003; Bazzaro et al., 2012; Charrier et al., 2014) et en tant qu'opérateur pour un système de travail, en l'occurrence un poste, voire un outil de travail. Rappelons que, selon Sagot, 1999, l'opérateur, en tant que professionnel, est caractérisé en fonction des tâches, des activités de travail, qu'il doit réaliser en employant des produits industriels, tandis que l'utilisateur est caractérisé en fonction des usages des produits. Nos travaux s'inscrivent parfaitement dans cette approche puisque, rappelons-le, notre objectif est de mieux anticiper l'activité de maintenance dans les phases de conception en maintenabilité en vue de sauvegarder la santé, le bien-être des opérateurs dédiés, et d'améliorer en même temps la performance globale des systèmes. De nombreux travaux (Duchamp, 1988; Garrigou et al., 2001; Quarante et Denielou, 2001; Broberg, 2007), dont certains portés par notre Pôle de recherche (Gomes, 1999; Sagot, 1999; Zwolinski, 1999; Sagot et al., 2003; Chitescu et al., 2003; Chitescu, 2005; Mahdjoub, 2007; Fenix, 2008; Mahdjoub et al., 2008; Guerlesquin, 2012; Bazzaro et al., 2012; Charrier et al., 2014) insistent sur le rôle central des utilisateurs/opérateurs dans le processus de conception de produits innovants, de façon à concevoir conjointement l'objet, le produit, le système et son usage. Ainsi, au sein de notre Pôle ERCOS, Chitescu et al. (2003), Sagot et al. (2003), Chitescu (2005), Mahdjoub (2007) et Mahdjoub et al. (2008) ont proposé une articulation entre ergonomie et conception de produits. Cette démarche s'adapte bien et rentre bien dans le cadre de nos travaux, car en effet il convient pour nous, in fine, de développer et de **concevoir des tâches de maintenance intégrant les besoins, les capacités et les limites des opérateurs de maintenance**, avec pour effet indirect, un impact sur l'architecture de l'hélicoptère, les outillages de maintenance ou encore les procédures pour réaliser ces tâches de maintenance.

La conception reste une activité collective, qui nécessite l'implication de plusieurs acteurs que l'on retrouve dans notre cas. Elle ne peut pas être une activité individuelle, comme le montre un des modèles de conception proposé par le Pôle ERCOS qui met en avant l'implication des différents acteurs métiers au centre de ce processus comme illustré sur la figure 1. Ces acteurs sont bien souvent issus de métiers différents et donc de cultures différentes. La conception est donc une activité transversale aux disciplines de chacun des acteurs, issus de différents métiers. Il s'agit d'une activité interdisciplinaire, qui nécessite l'implication de multiples acteurs, et qui conduit à une activité collective (Aoussat et al., 2000). Cette même figure 1 traduit également les étapes du processus de conception dans lesquelles évoluent ces acteurs-métiers. Les étapes partent du besoin jusqu'à une présérie du produit, en passant par les études de faisabilité, les études préliminaires, les études détaillées, la réalisation (industrialisation), en traduisant à chaque fois des étapes clés intermédiaires (Cahier des Charges fonctionnel, Avant-Projet/Préconcepts, Prototype et Présérie). Ces phases se suivent et sont en permanence en interaction avec un processus d'évaluation, de validation et d'optimisation par tous les acteurs métiers concernés comme : l'ingénieur en maintenabilité, le designer industriel, l'ergonome...

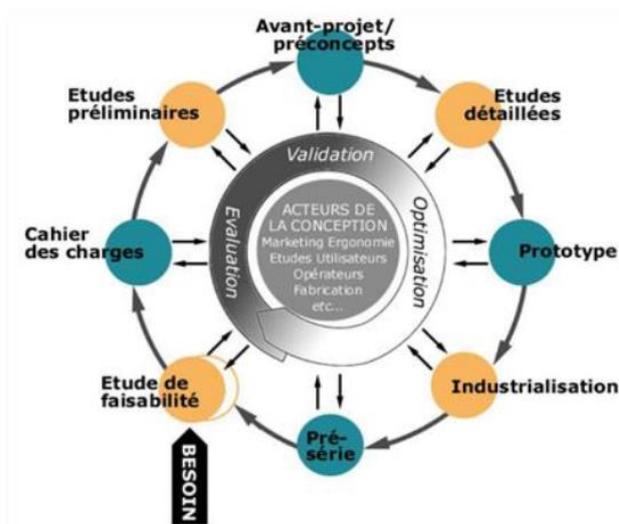


Figure 1 : Illustration simplifiée du processus de développement et de conception de produits, processus qui se veut coopératif et rétroactif, selon Sagot et al. (1998, 2003).

Au-delà du processus de conception et de l’aspect collaboratif multi-métiers, concevoir pour et avec le futur utilisateur/opérateur nécessite des méthodes, des outils et des connaissances dédiées (Sagot et al, 2003 ; Mahdjoub et al., 2013). En effet, concevoir pour l’utilisateur/l’opérateur nécessite de les connaître dans toutes leurs dimensions : physiques, psychologiques, physiologiques, sensorielles ou encore émotionnelles. Les travaux de recherche du Pôle ERCOS s’attachent ainsi à analyser, à étudier ces caractéristiques et les comportements, les régulations qui peuvent en découler de la part de l’utilisateur/opérateur, lors de l’usage d’un produit, d’un système, d’un outil dans un environnement donné (bruyant, chaud,...). Ces connaissances sont nécessaires, voire indispensables en vue justement de concevoir ces dispositifs, ces tâches, ces environnements, en accord avec leurs attentes, leurs besoins et leurs caractéristiques. L’homme, à travers ses capacités et ses limites, est ainsi mis au centre du processus de conception, facteur de sécurité, de santé et d’efficacité.

Dans le cadre de la demande formulée par l’entreprise, et en se référant au processus cité et aux autres similaires (Garrigou et al., 2001; Quarante et Denielou, 2001; Broberg, 2007), nos travaux se situent plus en phases préliminaires de conception, c’est-à-dire, ne s’appuyant que très peu sur les retours d’expériences liés à un usage régulier d’un produit/système déjà déployé sur le marché de consommation. Nous sommes ainsi dans un cadre plus **d’ergonomie de conception que d’ergonomie de correction**. En effet, lorsque la démarche ergonomique commence dès les premières phases de la conception, au niveau de l’analyse des besoins, et se poursuit tout au long du processus de conception, nous sommes dans une « ergonomie de conception ». Par opposition à "l’ergonomie de correction", où des modifications sont apportées aux produits, machines,... existants, pour contrecarrer des problèmes relevant de la sécurité, de la santé, du confort, et de l’efficacité du couple homme-machine. Dans notre cas, il y a nécessité d’anticiper l’activité future de maintenance. Dans ces phases de conception, l’anticipation passe souvent, pour ne pas dire toujours, par la simulation. Des outils dédiés à la simulation existent et permettent d’une part la simulation d’activité de travail et d’autre part la collaboration entre les différents acteurs-métiers composant le bureau d’études.

Les travaux de recherche conduits au sein du pôle ERCOS s'appuient, d'une part, sur l'utilisation d'outils de simulation à des fins de simulation des usages futurs de produits/systèmes. On retrouve les outils numériques tels que la réalité virtuelle (Baeumle, 2012; Bennes, 2013; Bennes et al., 2014; Bernard et al., 2017 ; Bernard et al., 2018), et/ou les outils physiques tels que des simulateurs de conduite, d'architecture d'habitacles (Roger et al., 2014; Vignais et al., 2016 ; Roger et al., 2018). D'autre part, ils s'appuient également sur l'utilisation de méthodes et d'outils d'évaluation ergonomique de produits, de systèmes, de tâches, ou encore d'environnements à partir de questionnaires, d'enquêtes d'usages, de grilles d'évaluation, d'analyses de la tâche et de l'activité, d'évaluations des contraintes énergétiques (efforts) et biomécaniques (port de charges,...), mais aussi de mesures physiques touchant l'environnement physique de travail, voire d'usage (bruit, lumière, chaleur,...) (Vignais et al., 2017 ; Zare et al., 2017 ; Zare et al., 2018).

Fort de son savoir dans la conception de produit/système centrée utilisateur (opérateur de maintenance dans notre cas), ainsi qu'en témoignent les travaux cités, le Pôle ERCOS a souhaité compléter et élargir ses travaux vers la conception de tâches de maintenance, faisant appel à des problématiques d'usage et d'exploitation des outils de simulation de la part de non experts en ergonomie au sein même du bureau d'études dédié à la maintenabilité.

Ce travail est donc né de la collaboration entre l'entreprise Airbus (Hélicoptères), et plus particulièrement son département maintenabilité, et le Pôle de recherche ERCOS du laboratoire ELLIADD, aboutissant à cette thèse de doctorat sous convention CIFRE en Sciences Pour l'Ingénieur (SPI).

2.2. L'entreprise : Airbus (Helicopters)

Dans cette partie, nous développons le contexte industriel dans lequel se sont déroulés nos travaux de recherche. Plus précisément, nous présentons le département de la maintenabilité où les acteurs métiers étudient l'activité future de maintenance qui sera opérée sur les nouveaux hélicoptères en cours de conception et de développement.

2.2.1. Le contexte industriel

Ce paragraphe a pour objectif de présenter le contexte industriel qui a motivé l'entreprise Airbus à engager ces travaux de recherche.

L'entreprise Airbus Helicopters se situe sur l'aéroport de Marignane (13), elle est un des leaders mondiaux dans la construction et la vente d'hélicoptères, qu'ils soient dédiés aux marchés civils, offshores, paramédicaux ou militaires. Le site de Marignane est composé d'un peu plus de 10 000 employés et a pour objectif d'imaginer, développer, construire, tester et livrer des hélicoptères. En d'autres termes, l'ensemble du processus de conception se concentre sur un même site. Des prestations de service sont proposées aux clients, telle que la maintenance d'hélicoptères, et sont

assurées sur ce même site de Marignane. Notons qu'un autre site Airbus (Hélicoptères) est situé à Donauworth (Allemagne). L'interaction avec les homologues allemands est quotidienne.

Nos travaux de recherche se sont réalisés au sein du département « maintenabilité », entité du bureau d'études étudiant et anticipant la maintenance des hélicoptères en développement et en améliorant celle de ceux déjà livrés. Ce département est composé d'une vingtaine d'ingénieurs et de techniciens, tous spécialisés en maintenabilité. Nos travaux de recherche ont été motivés par deux éléments principaux:

- Le premier élément provient du constat des clients, tous constructeurs d'hélicoptères confondus, où la maintenance reste complexe avec un taux d'indisponibilité parfois élevé, pouvant dépasser 5 heures de maintenance par heure de vol. Un des leviers d'amélioration est donc la réduction de la complexité des tâches de maintenance et de la durée de cette activité. Dans ce cadre, nos travaux, en intégrant l'ergonomie dans le processus de conception en maintenabilité, supposent qu'une conception anthropocentrée devrait pouvoir, à minima, faciliter l'activité de maintenance et améliorer la sécurité.
- Le deuxième élément provient d'un travail préliminaire, au sein du département maintenabilité effectué dans le cadre d'un stage de fin d'études avec l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) (2014), mettant en évidence tout l'intérêt d'une démarche ergonomique pour résoudre des problématiques liées à l'usage d'un outillage dédié à la maintenance. Cet outillage, permettant de lever un hélicoptère à patins (et donc sans roues) présentait d'importantes difficultés d'usage (pour le déplacer, l'installer et le désinstaller de l'hélicoptère) mais également des défauts mécaniques, notamment avec la présence de fuite de liquide hydraulique. Le département a, dès lors, considéré le facteur humain comme une voie possible d'amélioration qu'il est nécessaire d'explorer et d'étudier dans son ensemble, car permettant de l'articuler avec les exigences techniques. En particulier, l'amélioration de l'usage des outils de simulation numériques et physiques actuellement mis en place et qui a intéressé le département. Ces outils sont en effet vus comme des supports d'aide pour les acteurs-métiers en maintenabilité pour conduire des approches et des analyses de maintenabilité permettant de mieux intégrer le facteur humain dans les tâches de maintenance et donc dans la conception de nouveaux produits.

2.2.2. L'hélicoptère

Au sein du bureau d'études maintenabilité, l'objet des études concerne la maintenance des hélicoptères. Nous souhaitons ici décrire brièvement la technologie des voilures tournantes puisqu'elle sera au cœur de notre travail de recherche.

Un hélicoptère est un aéronef qui se caractérise par sa capacité à décoller verticalement et à réaliser le vol stationnaire. La sustentation de cet appareil est due à l'action de son rotor principal. Son rotor est composé de pâles possédant un profil similaire à celui d'un avion. C'est la vitesse de pénétration dans l'air (vitesse de rotation), qui va assurer la portance de l'hélicoptère. La mise en

rotation de ces rotors est assurée par une motorisation située sur la partie supérieure de sa cabine. Le rotor arrière, appelé plus communément rotor anti-couple, permet d'assurer le mouvement de lacet mais également de contrer le couple induit par le rotor principal qui tend à faire tourner la cellule dans le sens opposé. Ainsi, sans ce rotor anti-couple, l'hélicoptère ne pourrait pas voler en ligne droite. Le rotor principal et le rotor anti-couple sont dépendants l'un de l'autre puisque la motorisation entraîne d'abord le rotor principal, et c'est bien la rotation du rotor principal qui vient entraîner la rotation du rotor anti-couple par l'intermédiaire d'un arbre de transmission.

La demande de fiabilité est d'autant plus accrue que sans le fonctionnement des moteurs, l'hélicoptère ne se sustente plus ; contrairement à l'avion qui se sustente par la portance de ses ailes, dont les moteurs assurent la poussée et donc la vitesse. Sans moteur, un avion peut donc planer tandis qu'un hélicoptère chutera. Un système de sécurité existe, sous certaines conditions et paramètres de vol dont l'altitude, pour laquelle, suite à une panne moteur, l'hélicoptère peut réaliser une manœuvre de sécurité appelée autorotation. Evidemment, cette machine est d'une redoutable complexité qu'il convient de maintenir en état de vol. Les systèmes à maintenir sont nombreux, se divisant aussi bien en éléments mécaniques qu'électriques en passant par les systèmes hydrauliques. La figure 2 suivante montre les éléments principaux qui composent un hélicoptère et qui nécessitent une maintenance régulière :

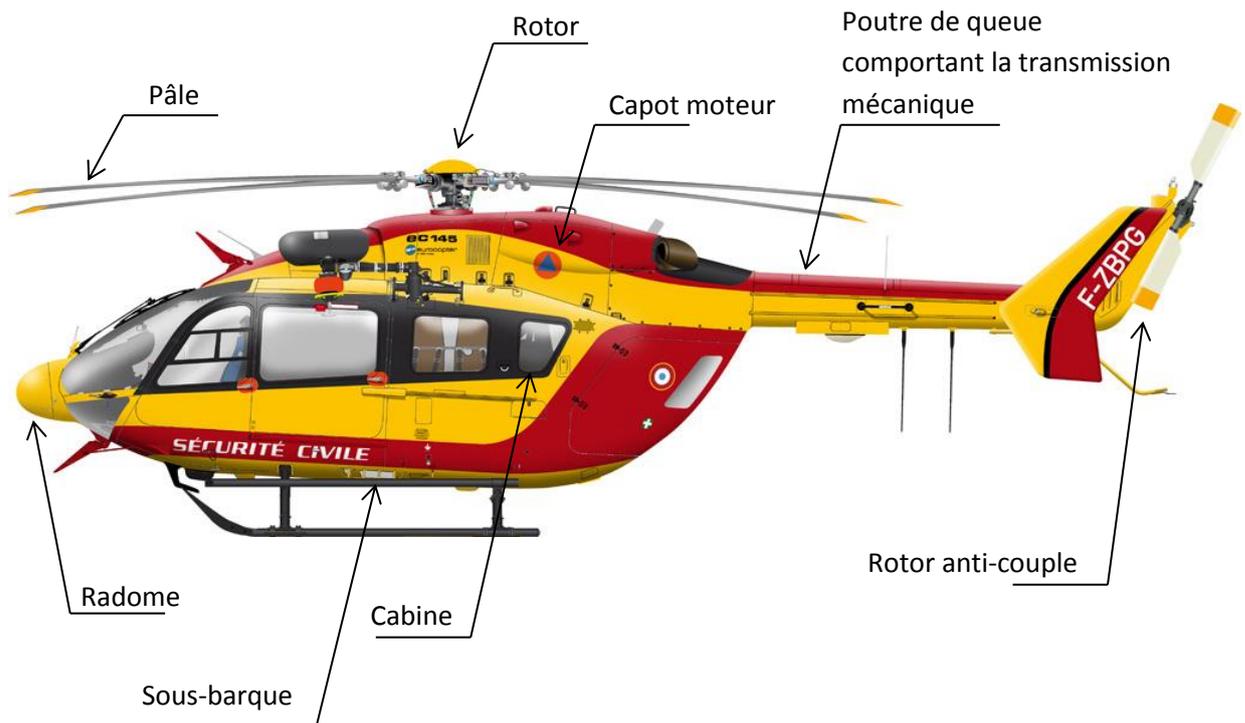


Figure 2 : Présentation des principaux éléments composant un hélicoptère (exemple du H145, catégorie médium ; 3,6 tonnes ; longueur 10,20 mètres ; hauteur 3,96 mètres).

3. Positionnement, objectifs et contributions

L'objectif de cette partie est de préciser notre travail de recherche conduit entre le laboratoire de recherche ELLIADD et l'entreprise AIRBUS HELICOPTERS. Au vue des thématiques de recherche traduites précédemment, nos travaux se situent à l'articulation des programmes 1 et 2 cités. Le programme 1 s'intéresse au développement de connaissances sur le fonctionnement humain lors des activités de maintenance à des fins de conception centrée sur l'opérateur de maintenance. Le programme 2 permet d'appliquer les connaissances acquises issues du programme 1, puisqu'il se positionne dans le champ du développement de méthodes et d'outils favorisant la conception produit/usage/service à partir d'outils de simulation. Notre recherche se veut ainsi transverse aux deux programmes de recherche du Pôle ERCOS.

Notre environnement industriel, la maintenabilité aéronautique, sous-entendu le bureau d'études, a pour objectif principal de concevoir les futures tâches de maintenance des hélicoptères. Les acteurs-métiers proposent alors des améliorations techniques d'un point de vue architecture, outillage ou encore procédure. Tous secteurs d'activité confondus, et en accord avec la littérature scientifique (AFIM, 2004), et les retours d'expériences des opérateurs de maintenance, l'activité de maintenance reste connue et reconnue pour être difficile et pénible, avec un taux de maladies professionnelles souvent élevé (troubles musculo-squelettiques en particulier). En effet, la maintenance aéronautique est une activité de travail très changeante, très variable en termes de difficultés physiques, cognitives ou encore organisationnelles. Notre approche se situe, comme déjà évoqué, en maintenabilité, pour laquelle nous formulons l'hypothèse que l'activité humaine en maintenance n'est pas suffisamment anticipée en bureau d'études. Plus précisément, l'articulation entre les critères de la conception mécanique et les exigences ergonomiques ne semble pas optimale, optimisée, ce que confirment plusieurs auteurs (Broberg, 2007 ; Broberg 2011 ; Kaljun & Dolšak, 2012). Cette articulation, qui touche le couple produit/usage, sera au cœur de nos préoccupations. Pour concevoir les futures tâches de maintenance, le concepteur doit d'abord comprendre l'opérateur, son métier, sa tâche (le prescrit), son activité de travail,... pour adapter en conséquence ses choix de conception, touchant aussi bien l'outillage, l'architecture ou encore les consignes et procédures de travail. On parle alors de conception centrée sur l'homme ou encore de conception anthropocentrée (Sagot, 1999). Cette démarche associe en particulier deux grandes compétences, deux savoir-faire, que sont les sciences de la conception et les sciences humaines et sociales, à travers l'ergonomie, même si ce n'est pas la seule discipline concernée. Les sciences de la conception sont pratiquées dans le monde du travail, par des acteurs-métiers souvent spécialisés en mécanique dans un environnement de travail spécifique tel que le bureau d'études, alors que les sciences ergonomiques sont pratiquées par des ergonomes dont l'environnement de travail est davantage le terrain, là où se produit l'activité de travail. Le travail collaboratif entre ces deux acteurs-métiers est essentiel et exige des méthodes ainsi que des outils partagés afin que chaque acteur-métier puisse se comprendre et ainsi mieux travailler ensemble. Le contexte en bureau d'études rend souvent difficile d'appréhender toutes ses dimensions, surtout si le bureau d'études n'est pas doté d'ergonome. Nous verrons que l'acteur-métier, pour mieux travailler sur le sujet, s'appuie sur des outils de simulation numériques et physiques afin de mieux prendre en compte le facteur humain dans ses travaux.

Jusqu'à présent, nous avons évoqué l'intégration du facteur humain dans la conception, en centrant notre recherche au travers de l'ergonomie qui dans la littérature citée, semble être l'approche la plus courante en bureau d'études et la mieux acceptée par les acteurs-métiers non spécialisés en facteur humain. Cependant, d'autres disciplines inhérentes à l'ergonomie étudient l'ergonomie en conception tels que la psychologie cognitive, expérimentale, la sociologie, la psychophysiologie (Darses et al., 2001 ; Sperandio, 2015). Egalement, au sein de l'ergonomie, il existe deux grands courants que nous proposons de détailler afin de comprendre la différence entre ces deux notions. Nous souhaitons ainsi enlever toute ambiguïté, clarifier et nous positionner pour le reste de ce mémoire de thèse, ainsi nous avons :

- L'ergonomie basée sur le composant humain souvent accrochée à l'approche anglo-saxonne et très normative (caractéristiques anthropométriques, psychophysiologique, rythmes biologiques, dépenses énergétiques...) Les études sont alors focalisées sur le fonctionnement humain faisant appel, par exemple, à l'activité neurologique des pilotes d'avion au travers d'électro-encéphalogrammes (Mandrick et al., 2016 ; Causse et al., 2017);
- L'ergonomie de l'activité aborde une approche dite « francophone ». On parle d'approche holistique prenant en compte l'activité d'êtres humains dans des situations de travail, distinguant tâches prescrites et activité réelles, étudiant l'interaction entre les personnes et entre les personnes et leur environnement de travail.

L'Association Internationale d'Ergonomie (IEA, 2000), qui regroupe les deux courants dans sa définition, décrit l'ergonomie comme « la discipline scientifique qui vise à la compréhension des interactions entre les humains et les composantes d'un système, c'est la profession qui applique principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes ». Pour l'IEA « les ergonomes contribuent à la conception et à l'évaluation des tâches, du travail, des produits, des environnements et des systèmes en vue de les harmoniser avec les besoins, les capacités et les limites des personnes ». L'IEA définit ainsi trois domaines de spécialisation de l'ergonomie, qu'il convient d'explorer dans toutes études ergonomiques : l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle. Cette approche pluridisciplinaire reposant sur l'analyse de l'activité et des composantes physiques, dans sa définition, semble répondre à notre problématique, s'intéressant notamment à la pénibilité au travail qui suggère que l'activité de maintenance est physiquement pénible avec une charge cognitive parfois élevée, associée à une organisation complexe et imprévisible (Misra, 2008). Ainsi, dans notre cas, nous aborderons donc le facteur humain à travers l'ergonomie en nous intéressant aux dimensions physiques, cognitives et organisationnelles définies par l'IEA. Nous les étudierons uniquement au travers d'indicateurs ergonomiques classifiés dans ces mêmes dimensions et correspondant aux méthodes et outils liés à l'observation d'une activité de travail et aux outils caractérisant le poste et l'environnement de travail.

Dans notre cas, **nous aborderons donc le facteur humain à travers l'ergonomie** et à cet égard nous nous intéresserons à ces différentes dimensions définies par l'IEA (physiques, cognitives et organisationnelles) puisque nous étudierons des indicateurs ergonomiques classifiés dans chacune

de ces dimensions avec des méthodes et des outils liés à l'observation d'une activité de travail. Egalement, lorsque nous aborderons le travail réalisé par les acteurs-métiers en maintenabilité, **nous parlerons d'analyse de maintenabilité intégrant une approche facteur humain**. En effet, une analyse ergonomique s'adresse à un spécialiste du domaine exploitant des méthodes et des outils spécifiques, ce qui n'est pas le cas des ingénieurs et des techniciens en maintenabilité qui eux, tentent d'évaluer certains critères relevant du facteur humain.

Le constat industriel et celui de la littérature nous amènent alors à identifier et à poser notre problématique générale :

Problématique : « Comment mieux prendre en compte le facteur humain dans les phases de développement et de conception en maintenabilité, là où les acteurs-métiers ne sont ni formés, ni initiés au facteur humain, et en particulier à l'ergonomie. »

Pour étudier notre problématique et tenter d'apporter une réponse, nous avons divisé notre démarche en quatre contributions majeures que nous diviserons en quatre chapitres. Les objectifs et les contributions associées sont présentés dans les paragraphes suivants :

Le premier objectif de nos travaux est de mieux comprendre le fonctionnement, les pratiques actuellement en place, mais aussi le rôle de la maintenabilité chez notre industriel. En effet, afin de pouvoir proposer des solutions pour mieux prendre en compte le facteur humain, il convient dans un premier temps de définir, de comprendre les pratiques en place, de conceptualiser le processus de conception déjà mis en œuvre, ainsi que le rôle de chaque acteur-métier composant le département étudié. Egalement, pour comprendre comment la prise en compte du facteur humain est aujourd'hui étudiée, il nous faudra questionner, interroger chaque acteur-métier pour comprendre son savoir, son savoir-faire, ses pratiques actuelles pour réaliser des analyses de maintenabilité avec ou non une approche du facteur humain, avec quelles connaissances, quelles méthodes et quels outils ?

Ainsi, notre première contribution a pour but de :

C1 : Comprendre au sein d'une entreprise pilote relevant de l'aéronautique, les pratiques mises en place pour intégrer le facteur humain en maintenabilité.

Le deuxième objectif, en lien avec le premier, est de lister et de comprendre les moyens et les outils actuellement utilisés par les acteurs-métiers en maintenabilité pour mieux prendre en compte le facteur humain et en particulier celui de l'opérateur de maintenance qui devra exécuter les tâches définies par les acteurs-métiers en amont.

Ainsi, notre seconde contribution est :

C2 : Observer, analyser, évaluer, dans l'état actuel des pratiques des acteurs-métiers en maintenabilité en bureau d'études d'un constructeur d'hélicoptères, les limites et les avantages des outils de simulation mis à leur disposition, à des fins d'approche du facteur humain.

Le travail réalisé pour répondre aux deux premiers objectifs nous amène également à vouloir comprendre comment l'acteur-métier en maintenabilité travaille, notamment pour aborder des analyses de maintenabilité avec une approche facteur humain et avec quels moyens, quels outils. Ainsi, la compréhension de l'usage des moyens et des outils dont dispose l'acteur-métier en maintenabilité, qu'il utilise ou non, nous amènera à mieux comprendre l'activité de l'acteur-métier en maintenabilité avec les moyens et outils actuellement associés et de proposer en conséquence une démarche pour une meilleure intégration du facteur humain sur la totalité du processus de conception en maintenabilité.

Notre troisième contribution est donc :

C3 : Sur la base des outils et moyens existants, développer une démarche favorisant l'intégration du facteur humain en maintenabilité pour des non experts en ergonomie.

Le développement de cette démarche nous amène à notre troisième objectif qui vise à son évaluation et donc sa validation au sein même de notre industriel et du département de maintenabilité.

Ainsi, notre quatrième et dernière contribution est :

C4 : Valider la démarche PEAM proposée au sein du département de maintenabilité de notre industriel aéronautique pilote.

Pour résumer, notre travail de recherche porte sur quatre contributions principales :

- La première contribution se focalise sur les acteurs-métiers du département de maintenabilité en étudiant leur savoir et savoir-faire autour du facteur humain, à travers l'ergonomie, notamment en termes d'outils d'analyses, ainsi que le comportement et les pratiques qu'ils adoptent pour l'intégrer sur l'ensemble du processus de conception;
- La deuxième contribution porte sur la compréhension des outils de simulation numériques et physiques, utilisés en maintenabilité, permettant la réalisation d'analyses de maintenabilité avec une approche du facteur humain sur l'ensemble des phases de conception en maintenabilité;
- La troisième contribution consiste à développer, en s'appuyant sur les deux premières contributions; une démarche dédiée à l'acteur-métier en maintenabilité afin qu'il exploite mieux encore les outils de simulation numériques et physiques à des fins d'approche du facteur humain;

- Enfin, notre quatrième et dernière contribution vise à valider la nouvelle démarche mise en place au sein de notre entreprise au travers le suivi de plusieurs projets et acteurs-métiers.

4. Organisation du manuscrit

Afin de répondre à notre problématique de recherche, notre manuscrit est composé de cinq chapitres. Nous présentons dans cette section l'organisation des différents chapitres en question, résumée dans la figure 3.

Le chapitre 1 qui s'intitule « **le facteur humain en maintenabilité** » se divise en deux grandes parties. La première concerne l'analyse de l'état de l'art. Nous définissons ainsi la maintenance et les organisations qui y sont associées. Un focus est réalisé ensuite sur la maintenance aéronautique qui engage des procédures particulières venant impacter directement le bureau d'études. Nous faisons ainsi le lien entre la maintenance et la maintenabilité qui, pour cette dernière spécialité, concerne la prise en compte de l'activité de maintenance dès les premières phases de conception. Cette approche nous amène à définir, toujours au travers de l'état de l'art, l'ergonomie intégrée à la maintenabilité. Nous pouvons alors proposer une formalisation de l'intégration de l'ergonomie au travers du processus de conception. Par la suite, nous abordons la deuxième grande étape de ce chapitre, concernant une observation des pratiques au sein même de notre industriel. Nous réalisons alors une première expérimentation qui nous amène à définir le degré de connaissance en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité puis le degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception.

Le chapitre 2 découle de l'analyse du premier chapitre et est titré « **les outils de simulation pour mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité** ». Nous observons en effet que les outils de simulation physiques et numériques sont connus et déjà utilisés par les ingénieurs en maintenabilité mais à des fins d'analyses de conception. Cependant, ces outils peuvent aussi être exploités pour réaliser des analyses de maintenabilité avec une approche du facteur humain. Ainsi, nous découpons une nouvelle fois ce chapitre. De la même manière que le premier chapitre, nous abordons d'abord une étude de la littérature à travers laquelle nous voyons que les outils de simulation, aussi bien numériques que physiques, sont déjà exploités pour réaliser certaines analyses ergonomiques mais pas toujours dédiés à l'anticipation des activités de maintenance aéronautique.

La deuxième partie de ce chapitre 2 quant à elle, propose une expérimentation qui a pour objectif, sur la base des outils de simulation et des méthodes actuellement utilisés dans le département maintenabilité, de réaliser des analyses ergonomiques de situations de travail de maintenance. Nous observons alors l'efficacité des outils de simulation pour réaliser des analyses ergonomiques autour des outils de simulation en maintenabilité. En particulier, nous dissociions les outils qui permettent de faire intervenir des opérateurs réels (réalité virtuelle, maquette physique) et les opérateurs virtuels (mannequin numérique). **Tous les outils de simulation étudiés seront ainsi comparés à l'aide d'un protocole d'analyse ergonomique rigoureux visant à étudier des indicateurs ergonomiques définissant les dimensions physiques, cognitives et organisationnelles** (IEA, 2000).

Le chapitre 3, intitulé « **Proposition d'une démarche d'intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique** », détaille le développement, en accord avec les observations des deux premiers chapitres, d'une démarche ayant pour objectif une meilleure prise en compte du facteur humain par des non experts en ergonomie dans un département de maintenabilité. La finalité pour l'acteur-métier est d'objectiver ces analyses pour rapidement trouver des compromis avec les critères techniques qu'il connaît et maîtrise déjà. Nous pouvons d'ores et déjà préciser que **cette démarche ne se substituera pas à l'expertise d'un ergonome mais orientera objectivement le concepteur dans ses choix initiaux au cours des analyses de maintenabilité**. Ce chapitre précise notamment la philosophie de la démarche en termes d'acceptabilité potentielle puisque l'objectif est que l'outil soit rapidement accepté et utilisé par l'ensemble des acteurs-métiers du département. Egalement, nous détaillerons l'approche conceptuelle en définissant au travers d'un graphique, la nouvelle démarche qui sera liée au processus déjà connu et déployé par les acteurs-métiers en maintenabilité. Enfin, nous décrivons le cheminement que doit faire le spécialiste en maintenabilité pour choisir le bon outil de simulation puis pour l'exploiter au travers d'un protocole qui lui permettra, en autonomie, de réaliser une première approche du facteur humain.

Le chapitre 4 intitulé « **Validation de la démarche PEAM** » se divise en deux parties. La première partie fait un état de l'art sur les méthodes et outils existants permettant d'évaluer des démarches exploitées en entreprise et plus particulièrement en bureau d'études. Dans un deuxième temps, sous forme d'une expérimentation, nous validons au travers de nombreux projets et acteurs-métiers comment notre démarche est déployée. Plus particulièrement nous essayons d'observer son efficacité pour d'une part mieux exploiter les outils de simulation et d'autre part réaliser des analyses de maintenabilité, intégrant une approche du facteur humain, objectives et utiles pour l'acteur-métier. Son retour d'expériences nous permet de connaître les avantages et les limites de notre outil.

Dans **le chapitre 5**, intitulé « **Discussion générale et perspectives** », nous faisons une synthèse de l'ensemble de nos résultats. Nous essayons d'articuler les liens existants entre maintenance, maintenabilité, facteur humain, outils de simulation et processus de conception. Egalement, l'apport de notre nouvelle démarche nous amène à aborder des perspectives à courts et moyens termes.

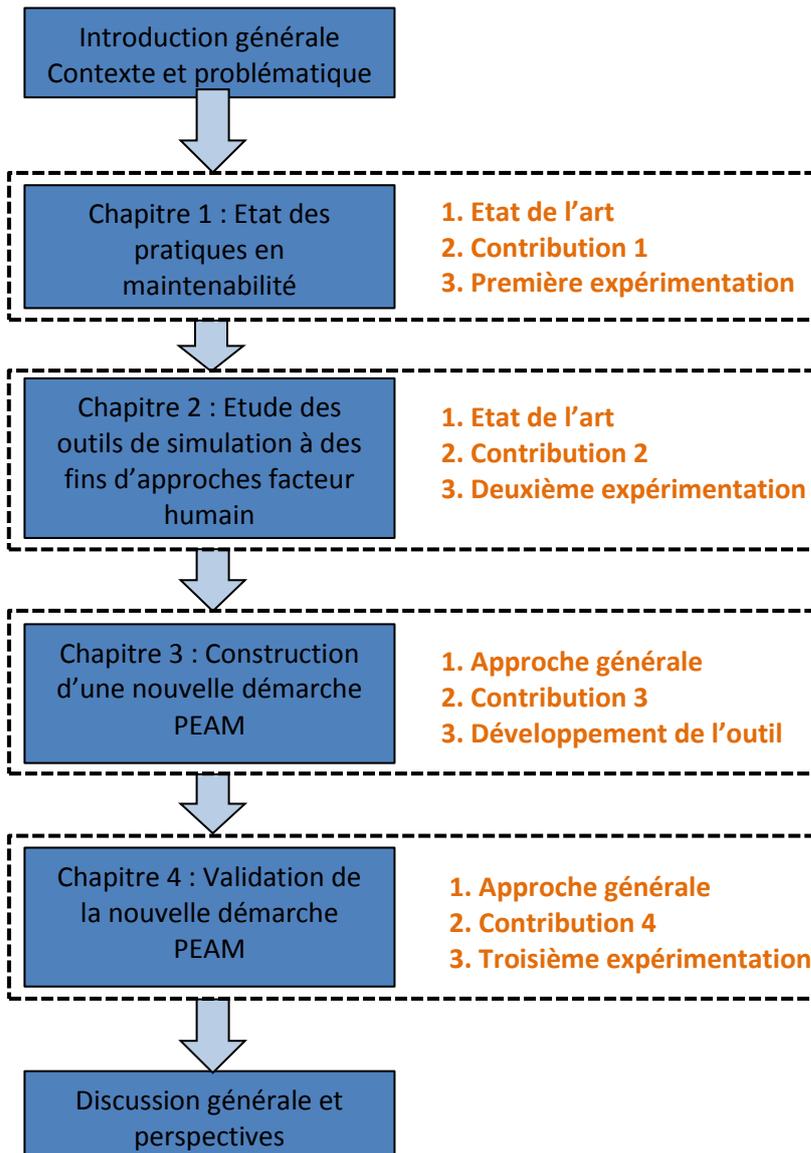


Figure 3 : Représentation schématique de l'organisation de notre mémoire de thèse.

CHAPITRE I. LE FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE

Ce chapitre a fait l'objet d'une **communication dans le cadre d'une conférence internationale** : Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017, January). "Consideration of Human Factors in aeronautical maintainability". Annual Reliability and Maintainability Symposium. (IEEE.), p37-43. DOI: 10.1109/RAM.2017.7889653 ;

et **d'un article dans une revue internationale à comité de lecture et référencé dans les bases de données internationales**: Bernard F, Zare M, Sagot J - C, Paquin R. Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability. Hum. Factors Man. 2019; 1–11. DOI : 10.1002/hfm.20792

Chapitre 1 : Le facteur humain en maintenabilité

1. Introduction	38
2. Etat de l'art	38
2.1. <i>La maintenance aéronautique</i>	38
2.1.1. Définitions générales.....	38
2.1.2. Concepts généraux	39
2.1.3. Organisation de la maintenance aéronautique.....	41
2.1.4. Maintenance & maintenabilité	45
2.2. <i>La maintenabilité aéronautique</i>	46
2.2.1. Du Design For Assembly (DFA) à la maintenabilité	46
2.2.2. Design For Maintainability (DFMaint)	47
2.3. <i>Le facteur humain en maintenabilité</i>	48
2.3.1. Généralités	48
2.3.2. Les indicateurs de maintenance: vecteurs d'informations pour la maintenabilité et support de l'approche du facteur humain	52
2.4. <i>Synthèse de l'état de l'art.....</i>	57
3. Première expérimentation : état des pratiques	60
3.1. <i>Contributions et hypothèses de recherche associées</i>	60
3.2. <i>Méthodes et techniques</i>	61
3.2.1. Questionnaire semi-directif.....	61
3.2.2. Analyse de documents techniques.....	68
3.3. <i>Présentation des résultats.....</i>	69
3.3.1. Degré de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité.....	70
3.3.2. Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception	77
4. Discussion	79
4.1. <i>Degré de connaissance en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité.....</i>	80
4.2. <i>Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception.....</i>	82
4.3. <i>Synthèse de la discussion</i>	84
5. Synthèse du chapitre et perspectives	86
5.1. <i>Synthèse du chapitre</i>	86
5.2. <i>Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité</i>	87

1. Introduction

Aujourd'hui, la maintenance prend une part de plus en plus importante dans les entreprises. D'ailleurs, elle est communément appelée « fonction de maintenance » la séparant ainsi distinctement des autres fonctions qui régissent le fonctionnement d'une entreprise (Monchy, 1987). Elle est considérée comme une fonction vitale puisque sans elle, le risque de rompre le processus industriel est souvent inévitable, surtout aujourd'hui où les entreprises conçoivent, possèdent des produits dits de plus en plus « complexes » (Mechin, 2007). La maintenance assure ainsi au produit la possibilité de continuer à fonctionner avec fiabilité et qualité, en assurant les fonctions et les objectifs pour lesquels il a été conçu. La maintenance s'applique aussi comme un service pour les clients achetant un produit, quel qu'il soit, afin d'en assurer le bon fonctionnement tout au long du cycle de vie du produit, ce que nous retrouvons dans notre entreprise d'accueil.

Ce présent chapitre décrit les définitions et les concepts généraux de la maintenance puis ceux de la maintenance aéronautique qui impliquent des exigences particulières et bien normalisées. Nous détaillerons ensuite le lien étroit qui existe entre la maintenance et la maintenabilité avant de s'attarder sur ce dernier domaine. Afin de comprendre la genèse de notre problématique générale, nous verrons un autre lien essentiel, celui qui lie la maintenabilité et le facteur humain, et en particulier à travers l'ergonomie, intégrant ainsi l'ensemble des connaissances, des compétences, des méthodes et outils associés, pouvant exister ou non au sein des entreprises, en l'occurrence au sein de notre entreprise d'accueil. Nous terminerons ce chapitre par nos hypothèses de travail qui justifieront et guideront l'ensemble des séries expérimentales qui seront conduites dans le cadre de ces travaux de thèse de doctorat.

2. Etat de l'art

2.1. La maintenance aéronautique

2.1.1. Définitions générales

La maintenance est un domaine qui fait l'objet d'une norme européenne (NF EN 13306, intitulée « Maintenance - Terminologie de la maintenance », 2018) et qui la définit ainsi « Ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ». La notion de cycle de vie est d'autant plus importante qu'elle appuie la nécessité de prendre en compte la maintenance à chaque étape, depuis le développement du produit jusqu'à son recyclage. D'ailleurs, dans la définition initiale de maintenance, le terme de « sureté de fonctionnement » est mis en avant représentant ainsi "l'ensemble des aptitudes d'un produit qui lui permet de disposer des performances fonctionnelles spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans dommage pour lui-même et son environnement" (Zwingelsteing, 2009).

Quatre grandes notions ressortent de la définition de la maintenance : fiabilité, sécurité, maintenabilité et disponibilité. Nous les définissons ci-dessous :

- La **fiabilité** représente l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise, dans des conditions données d'utilisation, pendant une durée donnée (Zwingelsteing, 1995) ;
- La **sécurité** est l'aptitude d'un système à accomplir sa fonction en respectant l'utilisateur et son environnement (Zwingelsteing, 1995) ;
- La **maintenabilité** est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits (Zwingelsteing, 1995) ;
- La **disponibilité** est, quant à elle, l'aptitude d'un bien, sous les aspects combinés de sa fiabilité, maintenabilité et de l'organisation de maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise, dans des conditions de temps déterminées (Zwingelsteing, 1995).

2.1.2. Concepts généraux

La maintenance, aussi complexe soit-elle, est divisée en plusieurs catégories qui influent principalement sur l'organisation générale d'une entité industrielle et sur les coûts au regard des indicateurs de performance d'une entreprise. En effet, la maintenance est aujourd'hui considérée quasi exclusivement comme une dépense de masse dans une entreprise dont il convient d'en réduire le volume. De nombreux travaux de recherches se sont focalisés sur ces aspects financiers et les indicateurs de performances qui gravitent autour (Glade et al., 2005).

Ces coûts peuvent être expliqués par le processus complexe de maintenance que détaille bien Zwingelstein, dans ses travaux (1996), laissant ainsi entrevoir les deux grands principes qui régissent la maintenance : la maintenance préventive et la maintenance corrective, ainsi qu'illustrées sur la figure 4 qui suit.

Pour plus de clarté, compte tenu de son importance dans notre travail, nous nous proposons de détailler la maintenance corrective d'une part puis la maintenance préventive d'autre part.

La **maintenance corrective** est définie comme « une forme délibérée d'entretien qui consiste, une fois la défaillance survenue, à en éliminer les effets et les causes » (NF EN 13306, Maintenance - Terminologie de la maintenance, 2018). On distingue généralement :

- La maintenance palliative effectue une remise en état provisoire du matériel ayant subi un dysfonctionnement : c'est un dépannage. Cette maintenance est le plus souvent associée à des systèmes ne présentant pas d'impératif de sécurité ;
- La maintenance curative correspond à la remise en état de l'équipement et revêt un caractère définitif. L'équipement concerné par cette maintenance retrouve, après intervention, les caractéristiques qu'il avait avant l'apparition du problème.

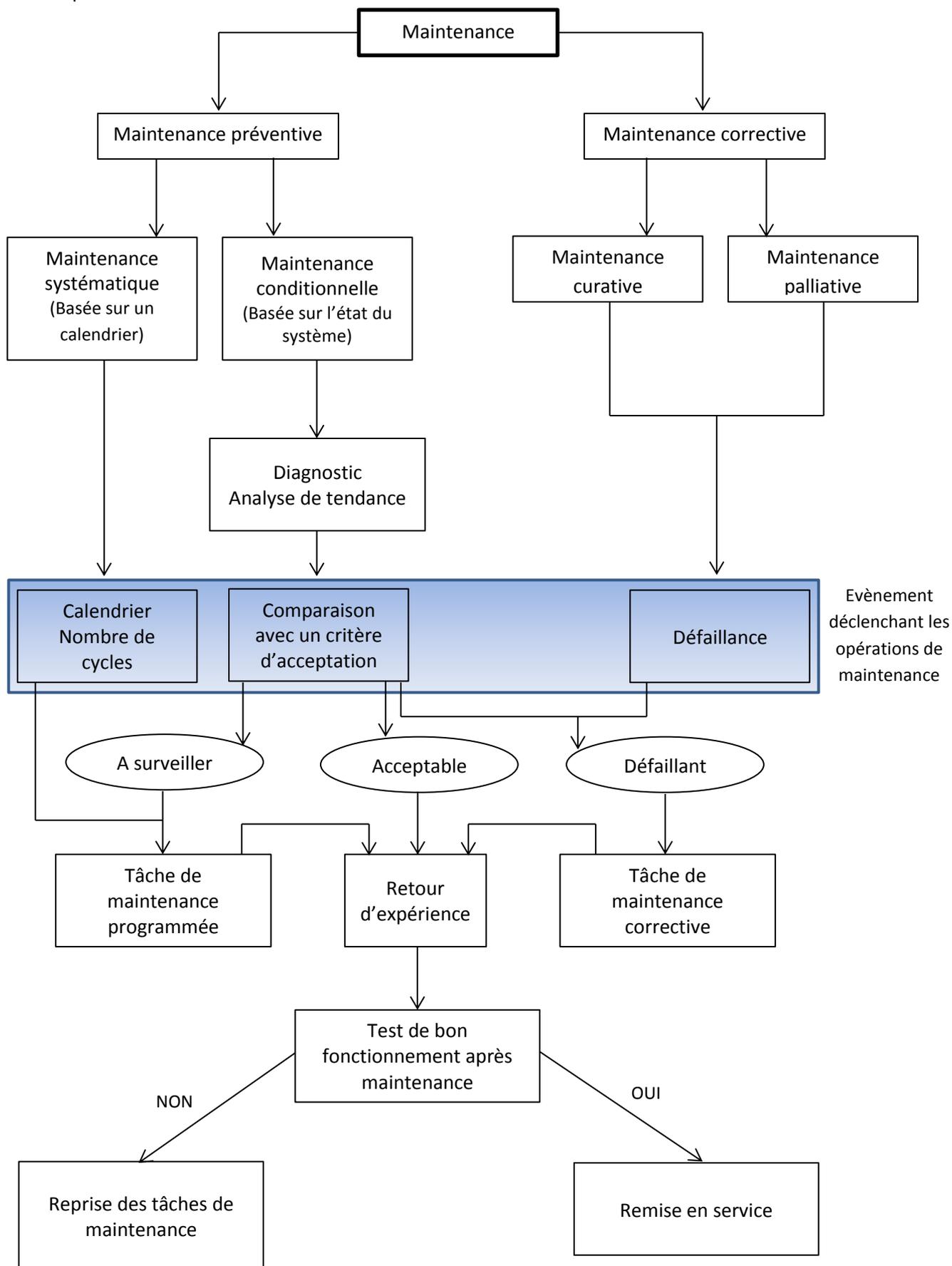


Figure 4 : Processus théorique de la maintenance: dissociant maintenance corrective et préventive (figure adaptée sur la base des travaux de Zwengelstein, 1996). Il convient de noter que la maintenance préventive déclenchée selon un nombre de cycles est la plus répandue car ne nécessitant pas de vérifications de critères, obligeant à une surveillance supplémentaire. La maintenance corrective intervient quasi systématiquement après une défaillance.

Fabien BERNARD

La **maintenance préventive** précède l'apparition du dysfonctionnement, ce caractère d'anticipation dépend de la présence de ressources appropriées, qu'elles soient humaines, matérielles et organisationnelles. Ce mode de maintenance permet de diminuer la probabilité de défaillances et/ou de dégradation du fonctionnement d'un système. Il doit induire un gain économique mesuré entre les coûts générés par l'intervention et la disponibilité qu'elle occasionne (NF EN 13306, Maintenance - Terminologie de la maintenance, 2018). On peut distinguer deux grands types de maintenance préventive :

- La maintenance systématique est caractérisée par la connaissance des dates de visite, l'intervalle d'inspection étant déterminé arbitrairement ou en fonction des lois de comportement du système ;
- La maintenance conditionnelle se base sur des signes précurseurs annonçant l'imminence d'un dysfonctionnement ou sur l'atteinte par l'équipement d'un certain seuil de dégradation.

A travers ces deux grands principes, celui de la maintenance corrective est la plus redoutée par les spécialistes en maintenance, à savoir par les opérateurs eux-mêmes, les ingénieurs spécialisés dans la gestion et l'organisation de la maintenance, puisqu'elle ne fait pas appel à l'anticipation, elle est d'ailleurs synonyme pour eux « d'urgence ». Nous reviendrons sur cette notion lorsque nous aborderons le facteur humain en maintenabilité. Ces deux principes sont utilisés dans de nombreuses entreprises, notamment celui du transport comme l'automobile (Creutzmacher et al., 2016), le ferroviaire (Santos et al., 2015), voire l'aéronautique, à l'image de notre entreprise d'accueil. Ce qui va nous focaliser plus spécifiquement sur l'organisation générale rencontrée en milieu aéronautique où en effet, l'objectif premier est d'éviter la maintenance non-programmée. Au-delà de l'aspect organisationnel et économique, c'est une question de sécurité aussi bien du personnel habilité que des passagers, si l'on se focalise sur le secteur aérien caractérisé aujourd'hui par le taux d'accidents le plus faible dans le domaine du transport, de l'ordre de 10^{-6} (1 accident grave pour 1 000 000 de mouvements) alors qu'il est de 10^{-5} dans le domaine ferroviaire et maritime (Chauvin, 2010).

2.1.3. Organisation de la maintenance aéronautique

Comme nous l'avons énoncé précédemment, deux types de maintenance sont aujourd'hui répertoriés : la maintenance préventive et la maintenance corrective, et le secteur aéronautique n'en est pas épargné, bien au contraire. Un aéronef subit en effet, une réglementation drastique par l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) et connaît quatre grands types de vérification dans lesquels peuvent s'effectuer une des deux maintenances citées:

- Visite A appelée « Check A » : effectuée toutes les 500h de vol ou tous les mois (occurrence dépendant du nombre de cycle décollage/atterrissage). Cette vérification est principalement visuelle et permet de changer les filtres, l'huile et de s'assurer du bon état général de l'appareil ;

- Visite B appelée « Check B » : tous les mois pendant une nuit, elle voit la vérification de tous les systèmes de secours (portes, toboggan, masques à oxygène etc.) ;
- Visite C appelée « Check C » : tous les 12-18 mois, l'avion est mis en hangar pendant une semaine. Tous les appareils électroniques sont testés, tout comme la structure. Les tests sont non destructifs (par exemple, ultra-son). Les moteurs ou encore le câblage des gouvernes sont également vérifiés ;
- Visite D appelée « Check D » : appelée aussi GV (Grande Visite), elle a lieu tous les 4 à 5 ans et dure environ 3 mois. L'avion est entièrement démonté et les pièces d'usure (pièces moteurs, avioniques etc.) ou abîmées sont changées. L'avion repart alors avec un niveau de fiabilité équivalent à sa mise en service, avec les dernières améliorations préconisées par le constructeur.

Pour toutes ces visites de maintenance, nous sommes dans un cadre de visites préventives qui peuvent devenir correctives si nécessaire. L'appareil doit donc être prêt à subir une intervention à n'importe quel moment, partout dans le monde par des personnes de cultures et de formations différentes et dans des conditions de travail qui peuvent fortement varier d'un pays à l'autre, d'un site à un autre, en termes de pénibilité, d'organisation, d'environnement, voire socialement.

La figure 5 illustre dans le domaine de l'aéronautique, en accord avec les travaux de Kinnison, 2004, le vieillissement croissant d'un appareil. Les visites A et B sont essentiellement préventives alors que les visites C et D ont un double rôle, préventif et correctif. Cette organisation entraîne des durées d'immobilisation plus longues mais ces deux dernières visites permettent d'assurer un allongement de la fiabilité technique de l'appareil à plus long terme. Ainsi, le vieillissement naturel et irrémédiable est moins rapide, il est contrôlé par les diverses interventions qui permettent de conserver un haut niveau de fiabilité et de qualité pour les éléments vitaux de l'appareil. La figure 5 illustre ainsi les fluctuations du niveau de fiabilité. Ce dernier est défini par le temps de bon fonctionnement d'un appareil entre deux étapes de maintenance planifiées (Dhillon & Liu, 2003). Ce niveau augmente après chaque fin de séquence de maintenance. De plus, plus le niveau de fiabilité baisse, plus la séquence de maintenance est longue et complexe. Avec le temps, nous pouvons noter également que le niveau de fiabilité décroît progressivement et n'atteint plus jamais le niveau maximal. Lorsque ce niveau de fiabilité a atteint un seuil minimal ne garantissant plus la sécurité optimale décidée par le constructeur, les organismes internationaux et nationaux officiels, l'aéronef est retiré des compagnies aériennes.

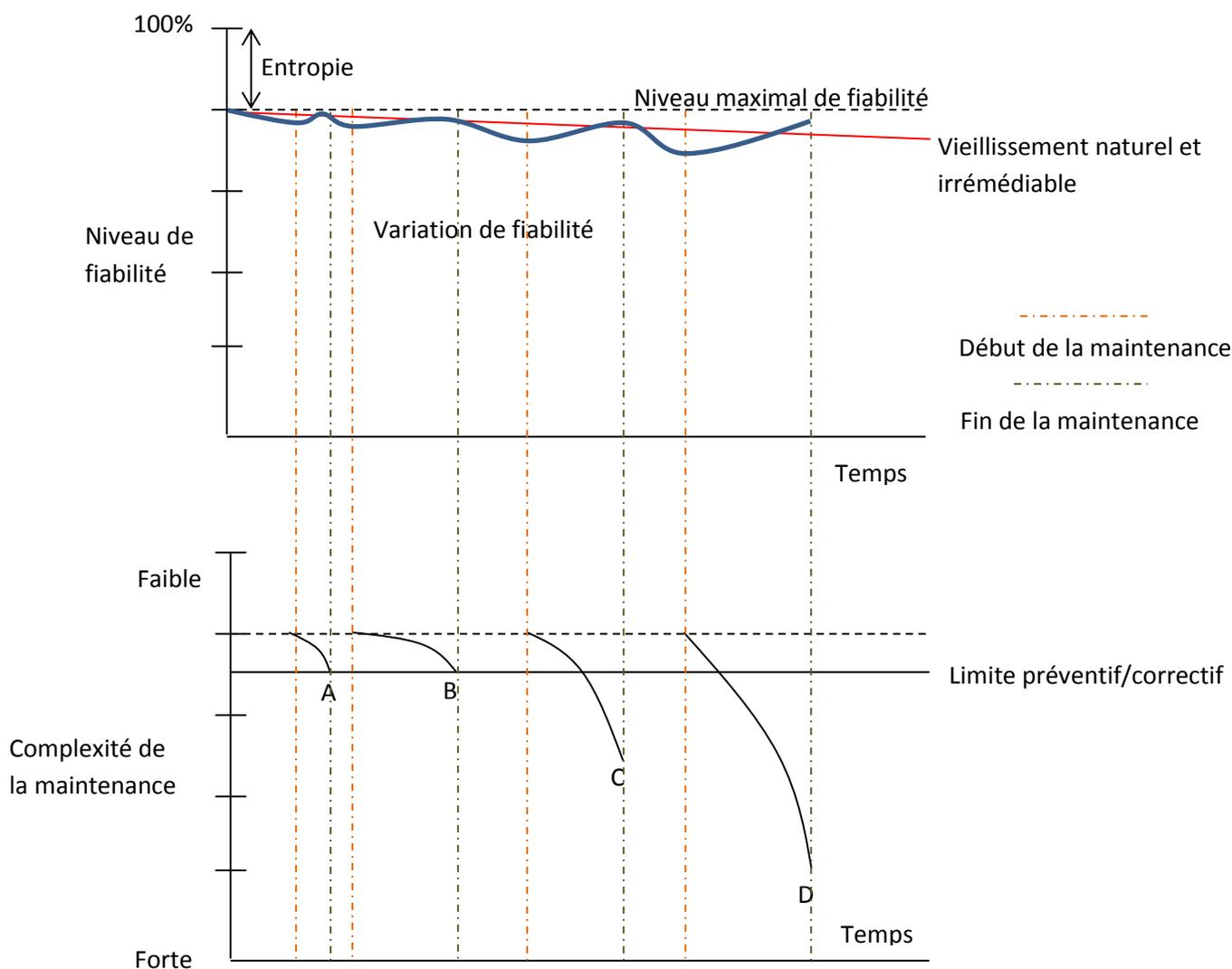


Figure 5 : Organisation générale de la maintenance dans le domaine de l'aéronautique ; graphe français et adapté de "Aviation Maintenance Management" by Harry & Kinnison, 2004

Nous pouvons également évoquer la notion de coût qui reste prédominante dans l'organisation de la maintenance. Notamment lorsqu'elle est calculée sur l'ensemble du cycle de vie de l'appareil donnant ainsi un indicateur appelé LCC (Life Cycle Cost) ou coût global de possession. Cette approche permet de voir le pourcentage du coût de la maintenance comparé à d'autres dépenses comme le coût d'acquisition de l'hélicoptère ou encore l'assurance. Afin de bien comprendre la part de la maintenance, les figures 6, 7 et 8 présentent la répartition des différents coûts qui constituent le LCC dans trois industries différentes : hélicoptère (Glade et al., 2005), automobile (Fédération française automobile club, 2002) et nucléaire (Bataille & Gailley, 2000). Pour le domaine des hélicoptères, celui-ci nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de nos travaux de recherche, la part de la maintenance et de l'exploitation prédomine et représente ainsi le pourcentage le plus important au regard des deux autres secteurs industriels.

Hélicoptère

■ Acquisition ■ Assurances ■ Exploitation et maintenance ■ Carburant

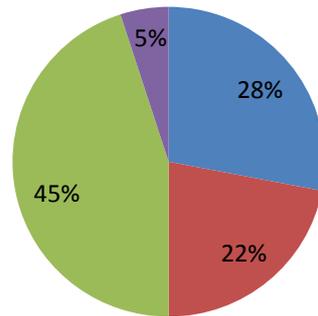


Figure 6 : Répartition du coût du cycle de vie pour l'industrie des hélicoptères, selon Glade et al. (2005).

Automobile

■ Acquisition ■ Assurances ■ Exploitation et maintenance ■ Garage/péage

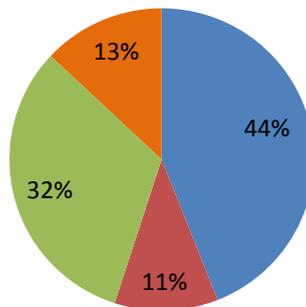


Figure 7 : Répartition du coût du cycle de vie dans l'industrie automobile (Fédération française automobile club, 2002).

Nucléaire

■ Acquisition ■ Démantèlement ■ Exploitation et maintenance ■ Combustible et traitement des déchets

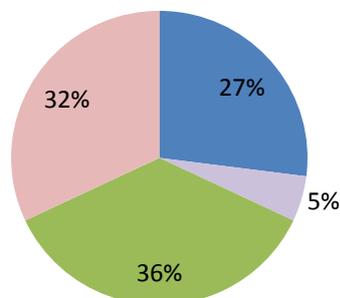


Figure 8 : Répartition du coût du cycle de vie dans l'industrie nucléaire, selon Bataille & Gailley (2000).

2.1.4. Maintenance & maintenabilité

La maintenance, de par sa complexité tant en termes d'organisation que de variabilité opérationnelle a un impact sur l'activité des personnes, tous métiers confondus. D'ailleurs, l'industrie aéronautique porte aujourd'hui une observation assez critique de la maintenance, notamment en termes de coût, le budget annuel représentant en effet souvent 12% à 15% des dépenses totales annuelles pour une compagnie aérienne exploitant des avions (Čokorilo, 2011), voire même 25% pour celle exploitant des hélicoptères (Land & Weitzman, 1995). Ces coûts résultent notamment de l'activité de maintenance réputée longue et complexe (Chang et al., 2010 ; Latorella et al., 2000). Cette activité est de surcroît reconnue pénible par 62% des opérateurs directement concernés (AFIM, 2004). En effet, l'opérateur de maintenance, pour conduire à bien sa mission, adopte des gestes, des postures pénibles associées souvent à des efforts importants (Di Gironimo et al., 2004). De plus, l'activité de maintenance est une succession de tâches, voire de sous tâches, qui requière également une forte concentration et donc une charge mentale souvent importante (Hobbs et al., 2003).

L'association française des ingénieurs et responsables de maintenance (AFIM) note également que les accidents survenant au cours des activités de maintenance sont 30% plus élevés que la moyenne des accidents du travail au niveau national, principalement dans les secteurs ferroviaires, automobiles et aéronautiques. Ainsi, la sauvegarde de la santé et l'amélioration de la sécurité des opérateurs de maintenance restent un enjeu majeur des études en maintenabilité. Pour appuyer ce constat, une étude réalisée par l'agence européenne pour la sécurité et la santé au travail pour des entreprises en Finlande, Belgique, Espagne et Italie explique qu'en 2006 entre 15% et 20% des accidents du travail concernaient le métier de la maintenance et 10 à 15% des accidents étaient mortels, principalement dus à des chutes de hauteur. Ce taux d'accidents est symptomatique de la difficulté de l'activité de maintenance puisqu'il est le plus élevé en entreprise tous secteurs confondus. Ainsi, pour améliorer les conditions de vie au travail des opérateurs de maintenance en termes de santé et de sécurité lors des activités de maintenance, le domaine de la maintenabilité reste une voie possible d'amélioration et prend une place de plus en plus importante lors des phases de développement et de conception de nouveaux produits et produits nouveaux tel que défini par Duchamp et al, 1999, et Aoussat et al., 2000. Selon ces auteurs la conception de nouveaux produits repose sur l'amélioration d'un produit existant sur lequel des améliorations sont proposées en accord avec les besoins clients. En revanche, la conception de nouveaux produits repose sur le développement de produits qui sortent du commun. Dans ce cadre, l'ICAO (International Civil Aviation Organization) et l'ATA (Air Transport Association) définissent des standards pour améliorer l'intégration et l'optimisation de la fiabilité, des coûts et de la maintenabilité pendant les phases de conception de produits nouveaux tels que les aéronefs (Dhillon et al., 2006 ; Fleischer et al., 2006). Selon la norme européenne EN 13303 (2010) intitulée « maintenance et terminologie de la maintenance », la maintenabilité définit la « capacité d'un produit à être maintenu ou réparé facilement lors des opérations de maintenance pour qu'il retrouve les fonctions pour lequel il a été conçu ». Cette norme précise également que la maintenabilité « peut-être quantifiée à travers des indicateurs et des mesures appropriées » par les experts métiers en maintenabilité. Ainsi, la maintenabilité n'est plus uniquement un domaine d'expertise à part entière mais un département

intégré au bureau d'étude jouant un rôle tout aussi important que les autres départements tels que l'architecture, la production, l'intégration électrique etc. Le paragraphe qui suit vise à expliquer plus en détail comment la maintenabilité est née et surtout comment elle a pris une place prédominante au cours des dernières décennies.

2.2. La maintenabilité aéronautique

Cette partie doit nous éclairer sur le lien existant entre maintenabilité et maintenance. Nous allons donc étudier pourquoi et comment les industriels ont, au cours de leur évolution, pris en considération la future activité de maintenance dans les phases de conception.

2.2.1. Du Design For Assembly (DFA) à la maintenabilité

Le postulat de base du Design For Assembly (DFA) est simple : plus le produit est facile à monter plus il peut être fabriqué en grande quantité. A ce constat, s'ajoute la pression de la concurrence, ainsi l'enjeu devient alors principalement économique. Dans les premières méthodes de DFA apparues au cours des années 1970, chaque pièce devait être conçue en fonction des interactions avec les autres pièces, afin d'assurer un gain sur la qualité, la fiabilité, sur les coûts généraux mais également sur les méthodes de travail (Boothroyd & Alting, 1992).

Dans les années 90, un nouveau paramètre est rentré dans les phases avancées de conception : le DFD (Design For Disassembly). Les industriels ont compris que dans le cycle de vie du produit, le client pouvait être amené lui-même à démonter son produit, par exemple, pour le réparer ou le recycler. Il a donc fallu imaginer un produit assemblable mais également démontable et cela avec un minimum d'outils (Boothroyd & Alting, 1992).

Suite à ces premiers travaux, ces deux phases n'ont jamais cessé d'être améliorées par les industriels provenant de tous les domaines (transport, produits électroménagers etc...). Ainsi, une étude a tenté de qualifier les pièces composant un système mécanique en évaluant quantitativement leur facilité à être démontées (Abdullah et al., 2007). Cette étude nous permet d'introduire deux autres notions particulièrement riches :

- L'optimisation mécanique du système impacte l'activité de maintenance. Ainsi, plus la conception du produit prend en compte les contraintes mécaniques et les exigences ergonomiques, liées à l'activité lors des phases de montage/démontage, nécessaires à l'acte de maintenance, plus ce dernier sera anticipé et aisé.
- L'anticipation des gestes, des postures, des efforts permettant la maintenance et l'intégration de ce même produit dans un environnement spécifique est possible grâce aux études de maintenabilité. Plus précisément, la maintenabilité peut être quantifiée sur la base d'un ensemble de critères qui dépendent directement de trois composants : l'accessibilité, la localisation des pièces et la qualification de la personne qui manipule le produit (Abdullah et al., 2007).

Afin d'approfondir cette notion centrale pour nos travaux de recherche, le Design For Maintainability (DFMaint) est développé dans la section suivante.

2.2.2. Design For Maintainability (DFMaint)

Aujourd'hui, dans la littérature du domaine, de nombreuses méthodes formalisent les études de maintenabilité à travers des objectifs de réduction de coûts, de temps, de maintenance et de fréquence (Serghides & Fielding, 1987; Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Nottingham et al., 1997; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Lee et al., 2007; Rui et al., 2009; Ding, 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen, 2015). Certaines reposent sur la mise en place de processus d'analyses de produits (Nottingham et al., 1997; Lee et al., 2007; Ding, 2009), ou sur des analyses mathématiques et probabilistes (Serghides & Fielding, 1987; Wani & Gandhi, 1999), d'autres sur l'application de normes ergonomiques dédiées à la maintenabilité dans le domaine aéronautique (ATA, 2000; ATSB, 1997; CAA, 2002), enfin la dernière catégorie de méthodes repose sur des outils de conception permettant de mieux définir et de mieux simuler des tâches de maintenance (CAO, mannequins numériques 3D reconfigurables, réalité virtuelle (Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Rui et al., 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen 2015). Cette dernière approche nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de notre travail, en accord avec notre entreprise d'accueil, qui cible en effet davantage cette façon de travailler sur la base de son expérience et des moyens techniques dont elle dispose.

Dans le cadre de cette approche reposant sur l'étude et la simulation des tâches de maintenance, différentes approches peuvent encore être utilisées en accord avec les travaux de Lee et al (2008) :

- Définition et mise en œuvre de cartes de travail : cet outil permet de caractériser les séquences et les tâches de maintenance à réaliser dans le but d'accroître la productivité, de gagner du temps et de l'argent tout en réduisant, dans la mesure du possible, la pénibilité au travail ;
- Conception d'outillages pour la maintenance : ces outillages spécifiques sont conçus pour aider et faciliter l'acte de maintenance par un opérateur. L'outil est également étudié pour s'adapter dans un environnement spécifique. Par exemple, un système de tractage motorisé est développé pour aider l'opérateur de maintenance à positionner l'hélicoptère au bon endroit (figure 9).



Figure 9 : Outillage appelé barre de tractage motorisée afin d'aider l'opérateur de maintenance à déplacer plus facilement l'hélicoptère au sol.

- Conception d'une architecture du produit facilitant la maintenance en termes de prise en main, d'efforts de démontage, de dimensionnements des trappes etc.... Les outils d'aide à la conception tels que le mannequin numérique et la réalité virtuelle sont également utilisés par les acteurs-métiers en maintenabilité afin d'évaluer la faisabilité de la future tâche de maintenance par l'opérateur spécialisé (Di Gironimo et al., 2004; Regazzoni & Rizzi, 2014).

A travers ces trois façons de faire, sachant qu'elles peuvent être complémentaires, la difficulté est de pouvoir conserver l'efficacité mécanique et esthétique du produit tout en y intégrant le facteur humain. Soulevons également à travers notre état de la littérature, la nécessité selon plusieurs auteurs (Garrigou et al., 2001 ; Zafiharimalala & Tricot, 2009 ; Begur et al., 2016) de conduire une étude approfondie de l'activité de travail de l'opérateur de maintenance pour mieux comprendre les tâches demandées, les activités réellement conduites, l'environnement et l'organisation de travail ou encore les outils mis à disposition, utilisés ou non.

2.3. Le facteur humain en maintenabilité

2.3.1. Généralités

L'intégration du facteur humain, à travers l'ergonomie, même si ce n'est pas la seule discipline à s'intéresser à cet enjeu, dans le processus de conception de la maintenabilité, semble être selon nous une solution pour mieux concevoir les tâches, les produits, les environnements,... pour les futurs utilisateurs/opérateurs. Ce point de vue est bien défendu et décrit dans les travaux de notre équipe de recherche (Sagot et al., 2003; Chitescu et al., 2003; Chitescu, 2005; Mahdjoub, 2007; Fenix, 2008; Mahdjoub et al., 2008; Guerlesquin, 2012) mais aussi par de nombreux auteurs (Duchamp et al., 1999 ; Garrigou et al., 2001 ; Falzon, 2004). En effet, que ce soit l'ergonomie physique, ou cognitive, voire organisationnelle, telle que définie par l'Association internationale de l'ergonomie (IEA, 2000), l'ergonomie à travers ses spécialités reste une discipline pertinente pour analyser, objectiver les conditions de vie au travail des opérateurs de maintenance, reconnues comme physiquement douloureuses et responsables d'une charge de travail cognitive et mentale importante selon plusieurs travaux (AFIM, 2004 ; Misra, 2008). Comme nous l'avons vu précédemment, la littérature semble mettre davantage l'accent sur le développement de processus d'organisation de la maintenance (comme l'organisation générale de la maintenance) que sur l'amélioration de la prise en compte de l'opérateur dans les activités de maintenance aéronautique (Van Horenbeek & Pintelon, 2014 ; Zwingelstein, 1996). Les indicateurs ergonomiques apparaissent surtout comme des exemples dans la documentation technique de la maintenabilité au lieu de fournir des définitions et des indicateurs objectifs pour intégrer, ou du moins considérer, le facteur humain dans la maintenabilité à part entière, en vue de faciliter la réalisation des tâches de maintenance (Garrigou et al., 2001). Dans ce cadre, nous pouvons, toujours sur la base des travaux de la littérature (Lee et al., 2008 ; Wann, 2014), faire ressortir les différentes manières qui permettent à l'ingénieur en maintenabilité de tenir compte de certains critères ou exigences liés au facteur humain au sein du processus de conception. Plus particulièrement, nous pouvons observer

trois grandes façons de faire, selon notre état de la littérature sur le sujet, sans prétendre être exhaustifs:

- La première approche concerne les **retours d'expérience** des clients (opérateurs de maintenance) reçus lors de la première étape de la gestion du cycle de vie du produit (PLM) (Lee et al., 2008) (noté 1 sur la figure 10). Le PLM inclut les différentes étapes (fabrication, production ou encore recyclage) avec des exigences considérées comme obligatoires, souvent normalisées à cet égard (délais, coûts, caractéristiques techniques...). Les principes ergonomiques sont mentionnés dans les exigences de chaque étape, mais seuls quelques détails sont expliqués, contrairement aux critères mécaniques. Par exemple, on peut simplement avoir un rappel indiquant la nécessité de tenir compte des caractéristiques de l'opérateur sans aucun autre détail. Cette approche est affinée en tenant compte, dès la première étape du PLM, des besoins clients qui font toujours l'objet d'analyses par anticipation et qui vont constituer le cahier des charges au même titre que les critères mécaniques (Lee et al., 2008). Au cours du PLM, l'étape de développement correspond au processus de conception et comprend des jalons tels que la définition, la conception, le prototype, la fabrication et l'analyse (Wann, 2014). La troisième partie de ce diagramme détaille l'interaction autour du facteur humain entre le département de maintenabilité et d'autres départements tels que l'architecture, l'hydraulique et l'aérodynamique tout au long du processus de conception. C'est dans ce cadre que les deux autres approches peuvent intervenir.
- La deuxième approche se centre sur **les analyses de maintenabilité intégrant une approche facteur humain au sein du département de la maintenabilité** (noté 2 sur la figure 10) qui doit jouer un rôle central concernant les études de maintenabilité. Cette approche est étudiée pour intégrer le concept de maintenance dans le processus de conception de produit (Wann, 2014; Pistikopoulos et al., 2000). Des études antérieures ont proposé des méthodes communes pour intégrer la maintenabilité tout au long du processus de conception de produit (Blanchard, 2014). Ces méthodes évaluent les indicateurs de maintenance tels que l'assemblage, le désassemblage et la tribologie (De Leon et al., 2012), tandis que les indicateurs d'évaluation du facteur humain tels que l'accessibilité ou le champ visuel sont très peu nombreux (Shi & Liu, 2012; Di Gironimo et al., 2004; Regazzoni & Rizzi, 2014) et relèvent exclusivement de la dimension physique de l'ergonomie, telle que définie par l'IEA (2000). Chaque département composant le bureau d'études devrait se rapprocher du département maintenabilité qui possède les connaissances et les moyens techniques pour analyser, anticiper et évaluer l'activité future de maintenance autour du produit, voire du système étudié. Cependant, tous les départements qui collaborent avec le département maintenabilité n'appliquent pas systématiquement ce travail de collaboration et de coopération autour du facteur humain. De plus, ces départements peuvent effectuer, de leur propre initiative, une étude avec une approche facteur humain pour vérifier certains indicateurs de maintenance touchant par exemple l'accessibilité d'une pièce, le contact avec l'environnement..., sans communiquer pour autant avec le département maintenabilité.

- La troisième et dernière approche concerne **les approches facteur humain ponctuelles réalisées dans les départements composant le bureau d'étude (par exemple, hydraulique et architecture)**, qui tentent d'intégrer le facteur humain dans le processus de conception sans réellement consulter le département maintenabilité. Cette approche n'est ni systématique ni axée sur la maintenabilité (notée 3 sur la figure 10). En effet, ces départements, de par leurs propres expériences, connaissances et initiatives, tentent d'analyser si le produit ou le système qu'ils conçoivent pourra être maintenu en termes de fiabilité et de qualité. Ils utilisent alors des indicateurs de maintenance et non ceux de la maintenabilité et encore moins ceux de l'ergonomie. Ce constat confirme les travaux de Sagot et al., 2003, qui montrent dans une série d'études conduites chez un grand nombre d'industriels, que le facteur humain, à travers l'ergonomie, n'est que très rarement intégré dans le processus de développement et de conception de produits. Les auteurs ont ainsi été amenés à suggérer une méthodologie de travail collaboratif en s'appuyant sur des mannequins numériques (MN), la Conception Assisté par Ordinateur (CAO), voire encore la réalité virtuelle (RV) pour justement mieux prendre en compte le facteur humain tout au long du processus de conception en l'articulant encore mieux avec les critères plus techniques, mécaniques,... bien maîtrisés dans un bureau d'étude (Sagot et al. 2003; Mahdjoub et al. 2013; Germani et al., 2012). Cependant, soulevons que l'usage de ces outils, déjà connus et utilisés en bureau d'étude, nécessite aussi un savoir et un savoir-faire particulier pour être réellement exploités à des fins d'analyses et d'études ergonomiques (Broberg, 2007 ; Kaljun & Dolšak, 2012).

La figure 10 résume ainsi les trois façons d'intégrer le facteur humain, sur la base de notre état de la littérature, dans le processus de conception dédié à la maintenabilité.

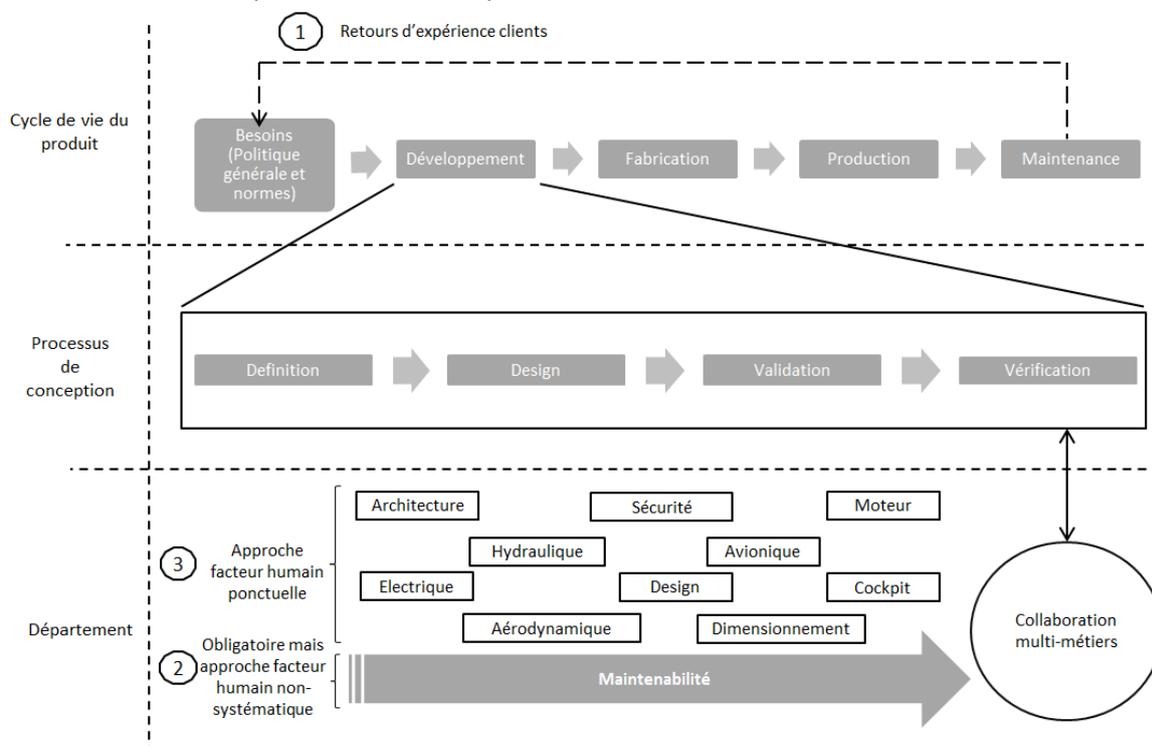


Figure 10 : Représentation des trois voies principales pour intégrer le facteur humain dans le processus de conception en maintenabilité. Figure construite sur la base de notre état de la littérature sur le sujet, en particulier les travaux de Lee et al.(2008) et Wann (2014).

Egalement, toujours sur la base des travaux de la littérature et des standards connus et reconnus, la nécessité de mieux intégrer le facteur humain en conception semble de plus en plus importante mais soulève néanmoins un certain nombre d'interrogations. En effet, plusieurs auteurs proposent l'utilisation, voire l'intégration de la simulation numérique pour mieux étudier les tâches de maintenance (Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Rui et al., 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen 2015 ; Zhou et al., 2016, Geng et al., 2013), d'autres s'intéressent plus à l'intégration des normes et standards ergonomiques, (ATA, 2000; ATSB, 1997; CAA, 2002) pour une meilleure prise en compte des capacités et des limites des personnes. Egalement, dans l'industrie aéronautique, la maintenabilité est amenée à prendre en compte le facteur humain pour anticiper la conception des aéronefs conformément au règlement CPA FAR / CS-25.1309, pour la catégorie des avions (EASA, 2011; FAA, 2012). La seule recommandation obligatoire est d'être capable d'assurer la fiabilité de l'avion pendant l'activité de maintenance. Pour le secteur des hélicoptères, il n'existe aucune recommandation particulière officielle, mais l'industrie des voilures tournantes prévoit un futur changement et considère l'intégration du facteur humain en maintenance comme une priorité pour accroître la sécurité des vols. Cependant, sans cadre de travail clairement défini, chaque industrie (avion et hélicoptère) est amenée à développer ses propres méthodes de travail en fonction de ses exigences.

De plus, comme nous avons pu le voir à travers la figure 10, construite sur la base des travaux de la littérature et résumant les 3 principales voies pour intégrer le facteur humain dans le processus de conception en maintenabilité, il ressort peu d'approches ou façons de faire réellement formalisées pour une intégration systématique des exigences ergonomiques dans les études de maintenabilité. En revanche, les travaux cités montrent néanmoins une réelle volonté de la part des acteurs-métiers en maintenabilité de mieux prendre en compte le facteur humain dans leurs études et analyses. Toutefois, il convient aussi de mentionner que lorsque ces études sont conduites, elles se focalisent essentiellement sur la composante physique de l'ergonomie, à travers par exemple, une approche anthropométrique pour des problèmes d'accessibilité, de champs visuels... (Shi & Liu, 2012; Di Gironimo et al., 2004; Regazzoni & Rizzi, 2014), mais très peu, voire pas du tout, sur les composantes cognitives et organisationnelles de l'ergonomie, déjà définies précédemment. Le concepteur en maintenabilité a pourtant l'obligation de qualifier, de quantifier, de valider ses analyses de maintenabilité intégrant une approche facteur humain pour donner du poids à ses arguments, surtout lorsqu'il travaille dans un environnement collaboratif, en interaction avec plusieurs acteurs-métiers dont les exigences sur un même produit sont souvent très différentes. Or, sans connaissance spécifique en facteur humain, le compromis discuté avec l'ensemble des acteurs-métiers du bureau d'études penchera davantage vers les valeurs fournies par des indicateurs techniques qui elles, sont connues et mieux maîtrisées par tous, basées très souvent sur des normes et des standards. Les acteurs-métiers du bureau d'études appuient donc leurs études sur des indicateurs qui se définissent par leur capacité à observer sur une période donnée les évolutions d'un phénomène préalablement choisi (Berrah, 2002). Ce sont des caractéristiques mesurables, mesurées, quantifiables et donc quantifiées. Selon la profession, pour être statistiquement crédible, il faut avant tout que l'indicateur retenu soit quantifiable et mesurable avant de passer dans un second temps sur l'analyse de l'activité qui peut découler de l'indicateur lui-même retenu. Ainsi, ces indicateurs de maintenance, utilisés en maintenabilité, sont nombreux et servent de référence à tous les acteurs-métiers du domaine. Alors même qu'ils sont définis par des ingénieurs pour des

ingénieurs, ils servent à analyser aussi bien l'efficacité de la maintenance en termes techniques, économiques et organisationnels, qu'en termes également de facteur humain. Les parties qui suivent détaillent ainsi les types d'indicateurs couramment utilisés en maintenabilité et comment ils sont exploités pour extraire des informations éventuellement liées au facteur humain.

2.3.2. Les indicateurs de maintenance: vecteurs d'informations pour la maintenabilité et support de l'approche du facteur humain

Aujourd'hui, pour anticiper l'activité de maintenance, un bureau d'études, à travers son département de maintenabilité, essaie d'évaluer la maintenance à travers des indicateurs. De très nombreuses études se sont portées sur l'évaluation de la maintenance via des indicateurs de temps et de coût. D'ailleurs, les normes établies aujourd'hui confirment cet état de fait. Par exemple, la norme française XP X 60-020 intitulée « Maintenance - Indicateurs de maintenance », présente des indicateurs de coût de maintenance, de disponibilité (et par extension de coût d'indisponibilité), de niveau de sécurité et de coût des défaillances. Ces indicateurs sont bien souvent ramenés à des ratios tels que le rapport des coûts de maintenance sur la valeur du bien à maintenir, ou encore le rapport entre les coûts et l'usage en accord avec les travaux de Glade et al. (2005) : le coût par heure de vol ou encore le coût par km par siège et par passager.

Dès lors, il apparaît que beaucoup d'indicateurs dédiés à la maintenance, à l'exception des indicateurs de niveau de sécurité, se regroupent autour du thème central de rentabilité économique. Les facteurs de performance en maintenance sont représentatifs d'une part, de ce que coûte la maintenance et d'autre part, de la disponibilité associée, à savoir ce que rapporte le système (Glade, et al., 2005). Cependant, en dehors de l'aspect normatif lié à la rentabilité, la littérature scientifique permet une vision plus large des travaux qui sont conduits autour des indicateurs en maintenabilité, et donc en bureau d'études, tous domaines confondus. Nous nous sommes ainsi proposés de faire un travail de classement touchant l'ensemble des indicateurs de maintenance pour la maintenabilité en accord avec la norme européenne EN 15341 (AFNOR, 2017), intitulée « Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance », qui distingue trois grandes catégories d'indicateurs : économiques, techniques et organisationnels. D'autres normes existent également, comme celle émise par l'association de maintenance américaine SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals) distinguant les catégories : économique et management, fiabilité du processus de production, fiabilité des équipements, formation, organisation du travail. Ces dernières catégories, vis-à-vis de notre travail, ne nous ont pas semblé, pour certaines d'entre elles, pertinentes. En effet, certains travaux de recherche identifient la fiabilité ou encore la qualité comme des critères à part entière et non des catégories comme définies par les normes citées (Coulibaly et al., 2008; Van Horenbeek et al., 2013).

Le tableau 1, que nous nous sommes donc proposés de construire en guise de synthèse des travaux de la littérature portant sur les indicateurs de maintenance pour la maintenabilité, fait bien ressortir un grand nombre d'indicateurs avec une plus grande proportion relevant de la catégorie

technique. En effet, cette catégorie représente 50% de l'ensemble des indicateurs, contre 29% pour la catégorie économique et 21% pour la catégorie organisationnelle. Certains indicateurs sont néanmoins communs à plusieurs catégories comme la fiabilité que l'on retrouve dans la catégorie technique et économique (Coulibaly et al., 2008; Van Horenbeek et al., 2013). La catégorie organisationnelle est à mettre en lien avec la catégorie économique qui est très orientée sur les coûts et les temps, dépendant grandement du niveau de formation et de qualification des opérateurs spécialisés (Wani et al., 1999 ; Lee et al., 2007). Notons également qu'un seul indicateur relève du facteur humain dans la catégorie organisationnelle et se définit autour de la notion d'erreur humaine dans les phases organisationnelles liées à la maintenance (Van Horenbeek et al., 2013). L'erreur humaine qui peut se définir, en accord avec les travaux de Reason (1990), comme l'écart entre la tâche prescrite et l'activité réelle, qui sous-entend dès lors que la séquence de travail établie est optimale et, que s'en écarter, aurait des conséquences sur l'organisation et les coûts.

Tableau 1 : Ensemble des indicateurs de maintenance pour la maintenabilité.

Groupe défini en accord avec la norme européenne EN 15341	Indicateurs de maintenance pour la maintenabilité	Références associées
Technique	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Accessibilité physique (collision) ▶ Accessibilité visuelle ▶ Assemblage ▶ Désassemblage ▶ Fiabilité ▶ Qualité ▶ Pièces de rechange ▶ Standardisation des pièces ▶ Modularité des pièces ▶ Identification des pièces ▶ Localisation ▶ Tribologie ▶ Simplicité ▶ Outils et équipements de maintenance ▶ Espace/volume de travail ▶ Environnement de travail ▶ Documents techniques 	<ul style="list-style-type: none"> ☼Boothroyd & Alting, 1992 ☼Wani et al., 1999 ☼Gomes De Sa et al., 1999 ☼Amundarain et al., 2002 ☼Ben-Gal et al., 2002 ☼Wani et al., 2002 ☼Amundarain et al., 2003 ☼Di Gironimo et al., 2004 ☼Rice et al, 2004 ☼Abdullah et al., 2007 ☼Coulibaly et al., 2008 ☼Ding, 2009 ☼Moreu De Leon et al., 2012 ☼Yongsheng et al., 2012 ☼Regazzoni et al., 2013 ☼Van Horenbeek et al., 2013 ☼Marzano et al., 2015 ☼Dalle Mura et al., 2016 ☼Das & Sengupta, 1996

<p>Economique</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ MTBF (Mean Time Between Repair) ▶ Fiabilité ▶ Qualité ▶ Disponibilité ▶ Fréquence de maintenance ▶ Temps net de maintenance ▶ Temps de diagnostic ▶ Coût de maintenance ▶ Coût des assurances ▶ Organisation générale 	<ul style="list-style-type: none"> ☼ Serghides & Fielding, 1987 ☼ Geyer et al., 1989 ☼ Carlier et al., 1995 ☼ Nottingham et al., 1997 ☼ Gomes de Sa & Zachmann, 1999 ☼ Wani et al., 1999 ☼ Amundarain et al., 2002 ☼ Amundarain et al., 2003 ☼ Di Gironimo et al., 2004 ☼ Fleischer et al., 2006 ☼ Lee et al., 2007 ☼ Wani et al., 1999 ☼ Abdullah et al., 2007 ☼ Coulibaly et al., 2008 ☼ Rui et al., 2009 ☼ Ding, 2009 ☼ Muchiri et al., 2010 ☼ Yongsheng & Liu, 2012 ☼ Moreu De Leon et al., 2012 ☼ Van Horenbeek et al., 2013 ☼ Kruger–Nguyen, 2015 ☼ Marzano et Al., 2015
<p>Organisationnel</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Niveau de formation ▶ Entraînement ▶ Organisation du personnel ▶ Communication entre départements ▶ Echange avec le client/fabricant/sous-traitant ▶ Facteur humain ▶ Accidents du travail 	<ul style="list-style-type: none"> ☼ Wani et al., 1999 ☼ Coulibaly et al., 2008 ☼ Anastassova et al., 2008 ☼ Moreu De Leon et al., 2012 ☼ Van Horenbeek et al., 2013

Les travaux de la littérature proposent ainsi un choix élevé d’indicateurs de maintenance pour la maintenabilité, mais comme nous pouvons l’apprécier sur notre tableau 1, beaucoup d’entre eux relèvent directement ou indirectement de facteurs économiques. Malgré tout, certains travaux se sont aussi penchés sur l’activité des opérateurs de maintenance, et plus particulièrement sur leurs capacités à bien réaliser leurs tâches (Di Gironimo et al., 2004 ; Regazzoni et al., 2013). Il est ainsi intéressant de noter que ces derniers travaux, contrairement aux autres, minorent plutôt l’intérêt économique face à la sauvegarde de la santé et du bien-être de l’opérateur dans son activité de maintenance (Regazzoni et al., 2013). Les travaux associés se concentrent majoritairement sur l’usage d’outils de simulation afin d’évaluer ces indicateurs avec une approche du facteur humain. Plus particulièrement dans la catégorie technique où les outils digitaux comme le mannequin numérique (Regazzoni et al., 2013) ou encore la réalité virtuelle (Gomes De Sa et al., 1999) sont quasi systématiquement utilisés permettant d’observer les postures, les efforts ou encore les volumes de travail (Geng et al., 2013). D’autres recherches s’appuient également sur les maquettes physiques (Das & Sengupta, 1996). Ces outils de simulation sont connus et maîtrisés par les acteurs-métiers en maintenabilité (Shephard et al., 2004). On note ainsi une prise de conscience au fil des années, sur les difficultés rencontrées dans la profession et dès lors un renversement progressif de la situation précédemment décrite. Il ressort, tous secteurs d’activités confondus, en accord avec de nombreux travaux (Thibault et al., 2013 ; Lux et al., 2016 ; Hoyos-Ruiz et al., 2017) qu’un poste de travail adapté implique une activité de travail plus aisée et moins contraignante pour l’opérateur de

maintenance ayant dès lors des bienfaits sur sa santé mais aussi sur l'efficacité du travail accompli avec des retombées forcément pérennes en termes économiques.

Nous pouvons ainsi ajouter qu'avec le développement de connaissances, de méthodes et d'outils autour du facteur humain, **les concepteurs commencent à comprendre que le coût et donc le temps dépendent aussi des capacités mais aussi des limites de l'opérateur à réaliser convenablement sa tâche de maintenance dans un temps et un environnement donnés**, d'où l'apparition progressive de critères techniques spécifiques à l'usage et à l'activité de travail de l'opérateur mais également de façon plus générale aux conditions de vie au travail.

Nous nous sommes également proposés, sur la base de ce qui vient d'être écrit, de construire un tableau de synthèse, sur la base des travaux de la littérature, qui résume les indicateurs de maintenance utilisés dans le cadre d'études de maintenabilité où le facteur humain est pris en compte. Le tableau 2 présente ce travail. Ces indicateurs permettent aux ingénieurs et aux techniciens en maintenabilité d'observer certains critères prenant en compte l'activité de l'opérateur dans l'exécution des tâches de maintenance. Cependant, nous remarquons que la prise en compte du facteur humain se focalise uniquement autour de la composante physique de l'ergonomie, définie, comme nous avons déjà pu le voir, autour des études anthropométriques, de l'activité physique en termes de gestes, postures et efforts, ou encore à travers l'agencement, l'aménagement des postes de travail. Ainsi, sur la base de notre analyse des travaux de la littérature, les indicateurs de maintenance permettant de prendre en compte le facteur humain traitent principalement de l'accessibilité (Di Gironimo et al., 2004; Abdullah et al., 2007), de volumes et d'espaces de travail, sous entendant également l'organisation du poste de travail (Moreu De Leon et al., 2012; Yongsheng et al., 2012), l'activité de travail en termes de séquences, plus particulièrement l'étude des séquences de désassemblage et d'assemblage (Marzano et al., 2015; Dalle Mura et al., 2016). Rappelons que le critère organisationnel est également étudié, notamment à travers le concept de l'erreur humaine.

Tableau 2 : Indicateurs de maintenance prenant en compte le facteur humain en maintenabilité.

Groupe défini en accord avec la norme européenne EN 15341	Indicateurs de maintenance, intégrant le facteur humain en maintenabilité	Références
Technique	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Accessibilité physique (collision) ▶ Accessibilité visuelle ▶ Assemblage ▶ Désassemblage ▶ Outils et équipements de maintenance ▶ Espace/volume de travail ▶ Environnement de travail 	<ul style="list-style-type: none"> ☀Boothroyd, G. & Alting, L., 1992 ☀Wani, M.F et al., 1999 ☀Gomes De Sa, A et al., 1999 ☀Amundarain et al., 2002 ☀Amundarain et al., 2003 ☀Di Gironimo et al., 2004 ☀Moreu De Leon et al., 2012 ☀Regazzoni, D et al., 2013 ☀Marzano, A et Al., 2015
Economique	/	/
Organisationnel	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Niveau de formation ▶ Entraînement ▶ Organisation du personnel ▶ Facteur humain 	<ul style="list-style-type: none"> ☀Wani, M.F et al., 1999 ☀Coulibaly, A et al., 2008 ☀Anastassova, M et al., 2008 ☀Moreu De Leon et al., 2012 ☀Van Horenbeek, A et al., 2013

Il convient également de souligner que la maintenabilité demeure, aujourd'hui encore, une activité assez nouvelle, en pleine croissance avec des études actuellement conduites qui restent assez objectives, au regard des indicateurs de maintenance utilisés, notamment pour évaluer les coûts, les temps ou encore la fiabilité des systèmes afin d'en planifier les échéances de maintenance (Harry & Kinnison, 2004). Ce degré « d'objectivité » s'appuyant sur des métiers relevant eux-mêmes des Sciences Pour l'Ingénieur (SPI) contraste quelque peu avec l'approche facteur humain réalisée en maintenabilité, qui relève plus des Sciences Humaines et Sociales (SHS). Cette articulation est finalement au cœur de notre problématique, en effet, il devient de plus en plus nécessaire de rapprocher, de raccorder, selon l'expression donnée par Iribarne, 1996, l'univers des technologies à celui des utilisateurs/opérateurs actuellement largement dissocié. En effet, ce rapprochement de disciplines, de métiers, avec les modes de raisonnements associés peut jouer un rôle majeur en maintenabilité rapprochant ainsi les dimensions techniques, mécaniques et la dimension humaine autour des exigences du facteur humain. Ainsi, comment peut-on faire travailler des personnes ensemble, issues de formations différentes? Comment quantifier une activité de maintenance en termes de risques, de sécurité et de santé pour l'opérateur? **L'articulation entre l'évaluation technique de la maintenance et l'évaluation de l'activité de maintenance qui en est associée s'inscrit profondément dans ce questionnement.** Cette compréhension doit ainsi permettre de créer un lien avec la maintenabilité relevant aujourd'hui plus des SPI que des SHS à travers l'ergonomie.

Ainsi, pour améliorer l'articulation entre les critères mécaniques et ergonomiques lors des analyses menées en maintenabilité, et donc cette collaboration souhaitée entre les différents métiers participant à un même projet, plusieurs travaux comme ceux de Moreu De Leon et al., 2012, ou encore de Van Horenbeek et al., 2013 développent une démarche qualitative puis quantitative traduisant une articulation déjà possible entre les deux approches citées. Nous proposons ainsi de détailler la démarche de De Leon, car elle se base sur des indicateurs ergonomiques couramment utilisés dans la littérature. On retrouve neuf critères : l'accessibilité, le séquençage de la tâche en termes de désassemblage et d'assemblage, le niveau de formation nécessaire pour réaliser la maintenance, l'organisation du personnel, l'environnement, la disponibilité des pièces de rechange, les caractéristiques des outillages de maintenance (masse, volume), le niveau de collaboration entre les différents départements du bureau d'études et la disponibilité d'une documentation pour aider l'opérateur dans sa tâche. Ainsi, De Leon propose d'évaluer le niveau de complexité et de difficulté d'une tâche de maintenance en la divisant en 5 niveaux, 1 étant la réalisation d'une tâche de maintenance simple pouvant être réalisée n'importe où, avec des outils standards et surtout sans connaissance particulière de la part de l'opérateur. Le niveau 5 est quant à lui beaucoup plus complexe puisqu'il suggère la modification de l'architecture d'un système en vue d'améliorer sa maintenance et d'augmenter son cycle de vie. Sur la base de ces niveaux de maintenance, il introduit des indicateurs ergonomiques qu'il propose de noter sur une échelle de 0 à 4. Par exemple, l'accessibilité aura cinq critères allant de 0 pour un « accès très difficile » à 4 pour une « très bonne accessibilité ». Pour la notation finale, l'indicateur sera noté pour les 5 niveaux de maintenance et moyenné pour l'ensemble des indicateurs notés. La qualification de la notation se définit en fonction du système étudié et du contexte de travail. Par cette méthode, l'auteur propose de quantifier simplement certains indicateurs relevant surtout encore de la composante physique de l'ergonomie qui pourront ainsi être discutés au même niveau que les critères techniques, mécaniques...

Le tableau 3 suivant résume cette démarche pour deux indicateurs qui ont été retenus sur les neuf proposés dans l'étude de De Leon et al., 2012 : accessibilité et assemblage/désassemblage.

Tableau 3 : Notation de deux indicateurs de maintenance, l'accessibilité et l'assemblage/désassemblage selon l'approche de Moreu De Leon et al., 2012. Cette étude permet de noter, sur cette même approche, 7 autres indicateurs de maintenance couramment utilisés : l'organisation du personnel, l'environnement, la disponibilité des pièces de rechange, les caractéristiques des outillages de maintenance (masse, volume), le niveau de collaboration entre les différents départements du bureau d'études et la disponibilité d'une documentation pour aider l'opérateur dans sa tâche.

Indicateurs	Critères	Echelle de notation	Niveau de maintenance				
			1	2	3	4	5
Accessibilité	<ul style="list-style-type: none"> • Porte • Seuil 	0 : Accès très difficile 1 : Moyennement difficile 2 : Difficile 3 : Aisé 4 : Très facile	3	2	2	1	2
Assemblage/Désassemblage	<ul style="list-style-type: none"> • Syst. Verrouillage • Roulement • Joint 	0 : Manipulation très difficile 1 : Moyennement difficile 2 : Difficile 3 : Bonne manipulation 4 : Très bonne manipulation	4	3	3	2	2
		Score Maintenabilité (moyenne par niveau)	3.5	2.5	2.5	1.5	2

2.4. Synthèse de l'état de l'art

Nous avons vu que la dimension économique guide les concepteurs et leurs choix depuis longtemps. Cependant, il est intéressant de constater que depuis les années 1990, pour étudier le facteur humain, la catégorie technique des indicateurs évaluant la maintenance apparaît comme un élément majeur. Des critères comme l'accessibilité, la facilité à assembler ou à désassembler notifiés à travers la rédaction de documents techniques deviennent des indicateurs au même titre que les indicateurs économiques. Par exemple, l'estimation du temps d'exécution d'une tâche de maintenance sera étudiée en incluant la difficulté à accéder à la zone de travail (Moreu De Leon et al., 2012). La notion d'organisation du travail en maintenance apparaît autour des années 2000 dans la littérature de la maintenance suite à la mise en évidence que certaines erreurs dans la pratique étaient dues à l'organisation même de l'activité de maintenance (Van Horenbeek, A et al., 2013). Ainsi, des indicateurs identifiant la formation, le taux d'accidents ou encore la capacité des opérateurs de maintenance à communiquer entre eux ont été exploités plus largement (Coulibaly, A et al., 2008; Moreu De Leon et al., 2012). Nous faisons également un autre constat majeur, au regard de la littérature étudiée, le nombre d'indicateurs de maintenabilité est très élevé dans les exigences à suivre alors que les quelques travaux ayant fait l'objet d'études industrielles, et donc de cas pratiques, montrent des exemples utilisant seulement quelques indicateurs récurrents tels que l'accessibilité, l'assemblage ou encore le désassemblage.

Egalement, nous remarquons que la littérature mentionne de nombreux outils de simulation qui permettent à l'acteur-métier en maintenabilité de qualifier voire de quantifier les indicateurs de

maintenance au sein même du processus de conception conventionnel. Ces ingénieurs, sur la base de leur savoir et savoir-faire, utilisent principalement des outils relevant de l'ingénierie, et non ceux dédiés à l'analyse ergonomique comme évoqué dans la partie précédente. Plusieurs études proposent des outils virtuels tels que le mannequin numérique ou la réalité virtuelle pour analyser l'accessibilité, l'anthropométrie, la posture et les efforts de l'opérateur dans le processus de conception (Perez et al., 2014; Krüger et Nguyen, 2015; Gironimo et al., 2004; Regazzoni et Rizzi, 2014; De Sa et Zachmann, 1999). D'autres études ont montré l'usage des outils de simulation physique (Das & Sengupta, 1996). Nous observons donc que, malgré l'usage d'outils de simulation, l'intégration du facteur humain en maintenabilité semble aujourd'hui incomplète et imparfaite, pouvant être à l'origine d'incidents, voire d'accidents, comme déjà évoqué en introduction.

Ainsi, l'ensemble de l'état de l'art fait ressortir une problématique majeure : l'articulation entre la maintenabilité et le facteur humain est aujourd'hui assez mal comprise, et, dans tous les cas, quasiment inexistante en bureau d'études. Nous pouvons ainsi exprimer, sur la base d'un état de la littérature portant sur l'analyse des indicateurs de maintenance utilisés en maintenabilité, que :

- Le concepteur, en maintenabilité, interprète des données en facteur humain en s'appuyant surtout sur des indicateurs propres à la maintenance, et non sur des indicateurs ou une démarche relevant du facteur humain, telle qu'une démarche en ergonomie, qui en s'appuyant sur ses propres composantes, physiques, cognitives et organisationnelles, permet une réelle compréhension des interactions entre l'opérateur et les autres composantes du système étudié ;
- Le concepteur travaille donc aujourd'hui en maintenabilité essentiellement à partir d'indicateurs de maintenance créés par et pour des ingénieurs en maintenabilité ;
- Depuis quelques années, une prise de conscience sur le manque d'articulation entre données techniques et ergonomiques a permis de mettre en avant des indicateurs qui intègrent mieux le facteur humain, mais principalement autour de la composante physique, voire organisationnelle, mais très rarement sur la composante cognitive;
- Certains travaux proposent ainsi des démarches afin d'objectiver les résultats, par l'intermédiaire de méthodes dédiées mais toujours portées par un regard de concepteur et non d'ergonome ;
- Pour mieux intégrer le facteur humain, les ingénieurs et techniciens en maintenabilité, utilisent des outils de simulation, souvent numériques comme le mannequin numérique et la réalité virtuelle, ou des maquettes physiques.

Nous observons aussi trois possibilités d'intégrer le facteur humain dans le processus de conception en maintenabilité d'après les travaux de la littérature, en particulier ceux de Lee et al., 2008, et Wann, 2014 :

- Au travers du « cycle de vie du produit » représentant ainsi une vue macroscopique de l'ensemble des étapes constituant la vie d'un produit, du processus de conception à son déploiement sur le marché de la vente, en passant par sa fabrication ou à son recyclage. La maintenance fait partie de ce processus et peut donc être prise en compte, on parle d'intégration ou de concept intégré (Tichkiewitch, 1994).
- Au travers du processus de conception incluant chaque phase d'étude, telle que celles liées à la conception, la validation ou encore la vérification avant production, où tous les métiers collaborent. Ces métiers sont répartis par département défini par leur spécialité (architecture, intégration des systèmes hydrauliques, aérodynamique, maintenance...). Dans cette organisation et toujours selon les travaux de la littérature, la volonté de prendre en compte la dimension humaine dans la conception des tâches de maintenance en bureau d'étude peut se faire de différentes façons :
 - Le département maintenabilité, qui de manière ponctuelle se penche que sur la question de l'activité future de l'opérateur de maintenance. L'analyse se fait en collaboration avec les autres départements impliqués dans le développement du système étudié (Shi & Liu, 2012; Di Gironimo et al., 2004) ;
 - Les autres départements (architecture, intégration hydraulique, électrique...) qui prennent l'initiative de faire leurs propres analyses et études autour de l'approche facteur humain mais sans forcément communiquer avec le département maintenabilité qui doit normalement valider la faisabilité de la future tâche de maintenance.

Notre objectif est donc, au regard de la littérature, de voir comment le facteur humain est intégré eu sein de notre industriel aéronautique pilote.

Pour tenter de mieux comprendre la démarche mise en place aujourd'hui dans l'industrie aéronautique, et plus particulièrement dans celle de la conception des hélicoptères, nous proposons de réaliser une observation industrielle, au sein même d'un département de maintenabilité, celui dans lequel nous conduisons nos travaux de recherche. Les parties suivantes visent à détailler le protocole mis en place, les acteurs métiers ayant pris part à l'expérimentation et les résultats qui en découlent.

3. Première expérimentation : état des pratiques

3.1. Contributions et hypothèses de recherche associées

L'état de l'art précédent a décrit comment mieux prendre en compte le facteur humain dans le processus de développement et de conception de produits (Duchamp et al., 1999 ; Garrigou et al., 2001 ; Sagot et al., 2003 ; Chitescu, 2005 ; Mahdjoub, 2007 ; et Mahdjoub et al., 2008, Bonnardel, 2009 ;). Or, en maintenabilité, la notion de facteur humain demeure bien plus discrète, notamment à cause, selon nous, d'un déficit de connaissances des acteurs-métiers concernés, ne disposant pas en effet d'un réel processus support et donc de méthodes associées pour intégrer le facteur humain dans les tâches de maintenance définies dans le produit en cours de définition et de conception. Ce constat nous semble d'autant plus vrai lorsque l'on observe le nombre plus important d'indicateurs techniques référencés définissant la maintenabilité comparés à ceux utilisés pour extraire des notions liées au facteur humain.

Un deuxième constat touche les outils supports pour une meilleure intégration du facteur humain, ces derniers relèvent de la simulation, numériques ou physiques, très utilisés par les ingénieurs en maintenabilité en accord avec les travaux de Di Gironimo et al., (2004) et Regazzoni et al., (2013). Or, les ergonomes déploient également des outils de simulation, numériques ou physiques, qui sont souvent, pour la plupart, les mêmes que ceux qu'utilisent les ingénieurs en maintenabilité ou plus largement, les ingénieurs-concepteurs (Perez et al., 2004 ; Kaljun & Dolšak, 2012 ; Krüger & Nguyen, 2015). Dès lors, des points de rencontre peuvent être imaginés, ceux que nous pouvons connaître en particulier en conception de produits, à l'image de nombreux travaux (Richir, 2003 ; Mahdjoub, 2007 ; Loup-Escande et al., 2013 ; Aromaa & Väänänen, 2016) qui détaillent les bienfaits des outils digitaux, en particulier la réalité virtuelle, comme outils de convergence et de collaboration entre les acteurs-métiers relevant de la conception et les ergonomes.

Dans le cadre de ces travaux de thèse réalisés dans le département de maintenabilité d'Airbus Helicopters, nous allons tenter de décrire les pratiques de travail des ingénieurs, pour savoir s'ils intègrent le facteur humain dans le cadre de leurs travaux, et si oui avec quelles connaissances, quelles méthodes et quels outils ?

Ainsi, notre première contribution se propose dans un premier temps de :

C1 : Comprendre au sein d'une entreprise pilote relevant de l'aéronautique, les pratiques mises en place pour intégrer le facteur humain en maintenabilité.

Pour ce faire, et en accord avec notre entreprise d'accueil et du département concerné, nous avons mis en place un protocole d'étude, qui se propose d'évaluer le niveau de prise en compte du facteur humain de la part des acteurs-métiers dans le cadre de leurs activités en maintenabilité. Pour ce faire, nous avons élaboré, un questionnaire semi-directif sur lequel, nous reviendrons, destiné aux acteurs-métiers du département maintenabilité. Cette première analyse a été

complétée par une étude des documents internes, relatifs à l'analyse technique de maintenabilité, rédigés par les ingénieurs et techniciens en maintenabilité d'Airbus et diffusés au sein des autres départements du bureau d'études de cette même entreprise. Ces documents intitulés par les acteurs-métiers « analyses de maintenabilité » fournissent l'ensemble des données techniques nécessaires et utiles aux autres départements pour optimiser le design des hélicoptères et des outillages de maintenance en vue d'améliorer la maintenance future du produit étudié, en l'occurrence un hélicoptère.

Dès lors, afin de répondre à notre première contribution, nous posons les hypothèses de recherche H1 et H2 suivantes :

- **H1** : l'absence de connaissances en facteur humain ne permet pas aux acteurs-métiers en maintenabilité d'intégrer efficacement le facteur humain dans les projets qu'ils conduisent ;
- **H2** : l'absence de méthodes prédéfinies et formalisées pour intégrer le facteur humain en maintenabilité explique une approche surtout techno-centrée en maintenabilité.

3.2. Méthodes et techniques

La démarche expérimentale déployée vise ici à comprendre en détails comment dans leurs pratiques de tous les jours, le facteur humain, en particulier autour des dimensions ergonomiques, est pris en compte et exploité, c'est-à-dire à quel moment du projet, avec quelles connaissances, quelles ressources humaines, quels matériels et outils associés. Il s'agira, au-delà des connaissances exploitées et des matériels utilisés, d'analyser comment évolue le niveau d'intégration de prise en compte du facteur humain dans leur processus de conception en maintenabilité, qu'il conviendra bien-sûr d'approcher et de mieux définir. Ainsi, notre analyse se base sur un questionnaire semi-directif, diffusé à une grande majorité des acteurs-métiers qui composent le département de maintenabilité. En parallèle, afin de compléter notre analyse, et en accord avec le groupe projet, une étude de documents techniques relatifs aux études de maintenabilité, rédigés par ces mêmes acteurs-métiers au sein de notre entreprise pilote, est conduite.

3.2.1. Questionnaire semi-directif

Le cadre de notre étude touche le département de la maintenabilité chez notre constructeur d'hélicoptères. Le département de la maintenabilité étudie les opérations de maintenance et propose des solutions techniques sur l'architecture de l'hélicoptère, les outillages de maintenance et les processus dédiés aux opérateurs de maintenance à des fins d'améliorer l'activité de maintenance des opérateurs spécialisés. Quinze employés de la maintenabilité, dont quatre techniciens et onze ingénieurs, tous spécialisés en mécanique, maintenance et aéronautique, ont été soumis à un questionnaire semi-directif pour cette première analyse dont l'objectif est d'approcher les pratiques de ces personnes en maintenabilité, leur niveau de connaissances en facteur humain et comprendre comment ils intègrent le facteur humain dans leur propre processus de conception. Les personnes ciblées représentent 83% de la population totale du département de maintenabilité. L'âge moyen et

l'expérience des personnes retenues sont respectivement de 28,8 ans ($\pm 5,6$ ans) et de 6,6 ans (2,2 ans). Le tableau 4 suivant détaille les caractéristiques des personnes qui ont été impliquées dans notre étude.

Tableau 4 : Caractéristiques des acteurs-métiers du département maintenabilité qui ont été amenés à répondre à notre questionnaire semi-directif, les personnes sont classées par ordre croissant en fonction de leur âge.

Sujet	Age Ans	Formation initiale	Fonction occupée	Formation en facteur humain
1	21	Technicien	Technicien	Non
2	23	Ingénieur	Ingénieur	Non
3	23	Technicien	Technicien	Oui (interne à l'entreprise)
4	23	Ingénieur	Ingénieur	Non
5	26	Ingénieur	Ingénieur	Non
6	27	Technicien	Technicien	Non
7	27	Ingénieur	Ingénieur	Non
8	28	Ingénieur	Ingénieur	Non
9	29	Ingénieur	Manager	Non
10	29	Ingénieur	Ingénieur	Non
11	32	Ingénieur	Ingénieur	Non
12	33	Ingénieur	Ingénieur	Non
13	36	Ingénieur	Ingénieur	Non
14	37	Technicien	Technicien	Non
15	38	Ingénieur	Ingénieur	Non

Le choix de réaliser un questionnaire semi-directif a été retenu pour sa capacité à récolter des données quantitatives mais aussi pour l'intérêt résultant des échanges verbaux qui en découlent, qui permettent d'aborder des aspects plus qualitatifs dans l'enquête conduite. Ces questionnaires permettent également, en accord avec les travaux de Fenneteau (2015) de récolter des données standardisées permettant par la suite d'effectuer un minimum d'analyses statistiques. En effet, un questionnaire permet de poser les mêmes questions de la même façon à différentes personnes (Brace, 2008). Bradburn et al. (2004) précisent également que la passation d'un questionnaire ne doit pas dépasser 10 minutes. C'est pourquoi notre choix s'est porté sur un questionnaire semi-directif permettant un échange verbal pour recueillir les impressions du sondé, pouvant permettre d'enrichir la compréhension des réponses du questionnaire.

Avant de construire ce questionnaire, il était essentiel de choisir les bons items qui le composeraient. Pour ce faire, des interviews informelles ont été conduites avec un expert en maintenabilité du département concerné, un ergonomiste interne à l'entreprise mais indépendant du département maintenabilité et également deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche. Ce quatuor a formé dès le début de notre recherche, le groupe de travail qui a suivi la totalité de nos travaux et qui a jugé pertinent l'ensemble des questions et items retenus, en s'appuyant sur les travaux de la littérature, sur lesquels nous reviendrons. Le questionnaire semi-directif mis en place est composé de 14 questions. Ce questionnaire a été rédigé en respectant les règles de la littérature spécifique à la rédaction d'un tel document (Bradburn et al., 2004), avec des questions dans la mesure du possible claires et compréhensibles par tous les employés. Également, avant la passation officielle, un questionnaire martyre a été rédigé et testé sur

deux personnes expertes indépendantes du département pour valider la compréhension des questions et valider ainsi le questionnaire.

Notre questionnaire semi-directif comprend trois grandes parties résumées dans le tableau 5. Nous y détaillons chacune des parties, en particulier celles portant sur les critères ergonomiques et les outils associés couramment utilisés lors d'analyses de maintenabilité intégrant une approche facteur humain, à l'image des travaux de Parsons (2000) ou encore de Li and Buckle (1999).

Tableau 5 : Parties composant notre questionnaire semi-directif soumis aux personnels du département de maintenabilité.

Sujets retenus	Critères analysés	Questions
Partie 1 : Renseignements sur le sujet (H1)	OBJECTIF 1 : Connaître les métiers, formations, postes, types de projet et « niveau de connaissance » générale en facteur humain.	Questions 1 à 8
Partie 2 : Renseignements portant sur les outils et méthodes ergonomiques utilisés.	OBJECTIF 2 : Identifier les critères ergonomiques et les outils associés utilisés par les acteur-métiers pour évaluer le facteur humain dans le processus de conception pour la maintenabilité des hélicoptères.	Questions 9 à 12
Partie 3 : Renseignements sur les étapes du processus où le facteur humain est pris en compte.	OBJECTIF 3 : Identifier les « zones d'intégration du facteur humain » dans le processus de conception et le niveau d'intégration à chacune des étapes du processus.	Questions 13 à 14

Ainsi, concernant les trois parties retenues, nous avons pour résumer la :

- **Partie 1** : qui se concentre sur la demande d'informations générales des personnes questionnées au travers de huit questions telles que l'âge, la formation, le poste ou encore la fonction occupée. L'analyse des questions doit pouvoir nous permettre de bien comprendre le profil de chaque acteur-métier du département maintenabilité interrogé.
- **Partie 2** : qui se propose d'évaluer le niveau de connaissance en facteur humain des personnes à travers quatre questions. Ces dernières se focalisent notamment sur deux points : les critères ergonomiques et les outils d'évaluation ergonomiques utilisés éventuellement dans le département de maintenabilité. Dans les études ergonomiques traditionnelles, différents critères ou facteurs peuvent-être utilisés pour évaluer une situation de vie au travail.

Pour construire notre questionnaire, nous avons identifié et classé ces différents critères en six catégories à l'aide de deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche et de la littérature décrite dans le tableau 6. Ce même tableau montre les catégories de critères et les critères associés. Ces catégories regroupent les approches de l'ergonomie définies par l'IEA (2000), à savoir : physiques, cognitives et organisationnelles.

Tableau 6 : Catégories de critères ergonomiques et critères associés les plus couramment utilisés au cours des analyses ergonomiques. Ils sont retenus pour le questionnaire semi-directif et diffusés au sein du département maintenabilité.

Catégories de critères ergonomiques	Critères ergonomiques	Auteurs sur le critère retenu, cités par la littérature
Critères en lien avec les ambiances physiques de travail	Qualité de l'air	Parsons (2000)
	Luminosité	
	Ambiance sonore	
	Ambiance thermique	
Critères en lien avec l'activité physique des opérateurs	Ambiance vibratoire	Li and Buckle (1999)
	Analyse des mouvements	
	Effort/force	
	Posture	
Critères en lien avec l'organisation de l'activité de travail	Durée de l'effort	Andersen et al. (2002); Cafakelli et al., (1977); Kausalya and Srinivasan (2012); Nishanth et al. (2015)
	Poste de travail	
	Autonomie de l'opérateur	
	Sécurité aire de travail	
	Formation	
Critères en lien avec les activités sensorielles et cognitives des opérateurs	Monotonie	Carayon and Smith (2000); Hart and Staveland (1988); Karasek (1979); Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
	Répétitivité	
	Durée de l'activité	
	Charge mentale de la tâche	
	Erreur humaine	
Critères en lien avec la santé au travail	Latitude décisionnelle	Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
	Champ de vision	
	Compréhension du prescrit	
Critères en lien avec les caractéristiques des opérateurs	Accidents et incidents du travail	Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
	Doléances et douleurs des opérateurs	
Critères en lien avec les caractéristiques des opérateurs	Anthropométrie (taille)	Nishanth et al. (2015); Salvendy (2012)
	Expertise (expériences et connaissances)	

Egalement, au regard des critères cités et retenus, nous avons recensé des outils d'évaluation ergonomique dédiés. La littérature nous a permis ainsi d'en extraire 35 couramment utilisés pour l'évaluation de situations de vie au travail, de systèmes ou encore de produits. Ces outils ont été également regroupés sous forme de catégories d'outils après échange avec notre groupe projet et sur la base des travaux de la littérature, le tableau 7 qui suit, reprend ceci.

Tableau 7 : Catégories d'outils ergonomiques et outils associés les plus couramment utilisés au cours des analyses ergonomiques. Ils sont retenus pour le questionnaire semi-directif et diffusés au sein du département maintenabilité.

Catégories d'outils	Outils	
Moyens de mesure des paramètres physiques environnementaux de travail	Accéléromètre, Thermomètre, hygromètre, luxmètre, sonomètre pour évaluer les ambiances physiques de travail Observation directe avec check-list standardisée Observation directe avec check-list personnelle Observation vidéo/photo avec check-list personnelle	Parsons (2000)
Moyens de mesure de l'activité physique de travail des opérateurs	Centrale inertielle (capteurs à l'intersection corps-machine,...) Dynamomètre Electromyogramme (EMG) Electrocardiogramme (ECG) Equation révisée du NIOSH (lever de charge) Goniomètre/Electro-goniomètre (mesure sur l'opérateur) Observation directe avec check-list standardisée Observation directe avec check-list personnelle Observation vidéo/photo avec check-list personnelle Analyse de l'activité (logiciels dédiés tels que Captiv, Xsens...)	Li and Buckle (1999)
Moyens de mesure pour évaluer l'ergonomie organisationnelle	Chronomètre Observation directe avec check-list standardisée Observation directe avec check-list personnelle Observation vidéo/photo avec check-list personnelle Analyse de l'activité (logiciels dédiés tels que Captiv, Xsens...)	Andersen et al. (2002); Cafakelli et al., (1977); Kausalya and Srinivasan (2012); Nishanth et al. (2015)
Moyens de mesure des données cognitives et psychosociales	Chronomètre Observation directe avec check-list standardisée Observation directe avec check-list personnelle Mesures psycho-physiologiques (données biologiques, électro-physiologiques,...) Questionnaire sur les risques psychosociaux Questionnaire sur le stress professionnel (Karaseck) Questionnaire sur la charge mentale (NASA-TLX...)	Carayon and Smith (2000); Hart and Staveland (1988); Karasek (1979); Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
Moyens de mesure pour évaluer la santé au travail	Checklist de sécurité & évaluation des risques au travail Questionnaire santé	Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
Moyens de mesure des caractéristiques des opérateurs	Questionnaire pour évaluer le niveau de connaissances Trousse anthropométrique	Nishanth et al. (2015); Salvendy (2012)

A travers notre analyse, nous chercherons à identifier l'importance allouée à chaque critère étudié et l'importance de la prise en compte de chaque outil utilisé, pour chaque catégorie de critères. Chaque outil est indépendant et ne mesure pas les mêmes critères. Par conséquent, pour chaque catégorie de critères, nous avons calculé le pourcentage moyen des critères étudiés et des outils utilisés par chaque acteur-métier de maintenabilité. Si une catégorie est définie par 5 critères et 7 outils, et si les acteurs du département de

maintenabilité traitent seulement 1 critère et 2 outils, on obtient un score de 20% pour les critères et un score de 28,5% pour les outils. Nous avons souhaité ainsi avoir deux approches, la première étant une observation macroscopique, tous critères et outils confondus, les résultats pouvant être traités à partir du test statistique de Mann-Withney (Birnbaum, 1956). La deuxième approche sera plus une vue microscopique pour explorer la qualité de la prise en compte de chaque catégorie et de la relation entre la diversité des critères étudiés et les outils associés utilisés par l'acteur-métier de maintenabilité. Les comparaisons pourront être conduites à partir d'un test de « t-student », par des mesures dites répétées, tenant compte du pourcentage moyen des critères étudiés et du pourcentage moyen des outils utilisés. En effet, nous pouvons faire raisonnablement l'hypothèse que plus il y a de critères étudiés, plus il devrait y avoir d'outils associés.

- **Partie 3** : la troisième partie du questionnaire semi-directif vise à connaître, voire à évaluer le niveau d'intégration du facteur humain dans le processus de conception de la maintenabilité en s'appuyant en particulier sur deux questions et une figure formalisant le processus de conception fourni par le département maintenabilité de notre industriel pilote (Figure 11). Les neuf étapes, qui le composent, sont en total accord avec la littérature scientifique (Clarkson et Eckert, 2010). En effet, il reprend les étapes essentielles qui définissent tout processus de conception de produit, à savoir :
 - L'analyse de la demande permettant d'interpréter le besoin émis par les utilisateurs ;
 - Le pré-design définissant les principales caractéristiques retenues et attendues pour le futur produit ;
 - L'appel d'offres permettant de faire intégrer du savoir et savoir-faire spécifique, voire du matériel spécifique, le temps du projet ;
 - La revue de pré-développement permettant de figer les caractéristiques principales ;
 - L'analyse de la maintenabilité qui va permettre de définir si le futur produit, dans l'état actuel du développement, pourra être facilement maintenu ou non ;
 - La validation du design permettant de figer l'architecture du produit, dans une phase collaborative avec les autres départements impliqués dans le développement du produit. Cette phase est itérative et peut revenir à l'étape d'analyse de la maintenabilité si la maintenance future est jugée comme dégradée ;

- Le développement du produit permet de construire un prototype pour effectuer des tests réels ;
- La validation, étape fortement collaborative, permet de définitivement figer l'architecture et les compromis faits entre les différents départements du bureau d'études ;
- La certification permet de valider auprès des autorités le produit afin qu'il soit livré au client.

Egalement, ce processus fourni par l'entreprise d'accueil reste générique, non confidentiel et connu de tous car décrivant bien les étapes du processus que doivent suivre chaque acteur-métier en maintenabilité. Ce processus a l'avantage de fournir une représentation rapide et précise de chaque étape composant le processus de conception du département maintenabilité.

Rappelons que nous avons retenu l'hypothèse que les techniciens et ingénieurs de maintenabilité intègrent le facteur humain dans leurs analyses de maintenabilité selon deux possibilités : (1) la réalisation d'une étude ergonomique ou (2) la collaboration avec d'autres départements pour échanger et parvenir à un compromis entre les critères mécaniques et les exigences ergonomiques pendant tout le processus de conception. Chaque personne interrogée devait alors annoter des repères rouges et / ou jaunes en fonction de l'étude ergonomique ou en discutant / collaborant uniquement à propos de l'approche du facteur humain au cours de chacune des étapes.

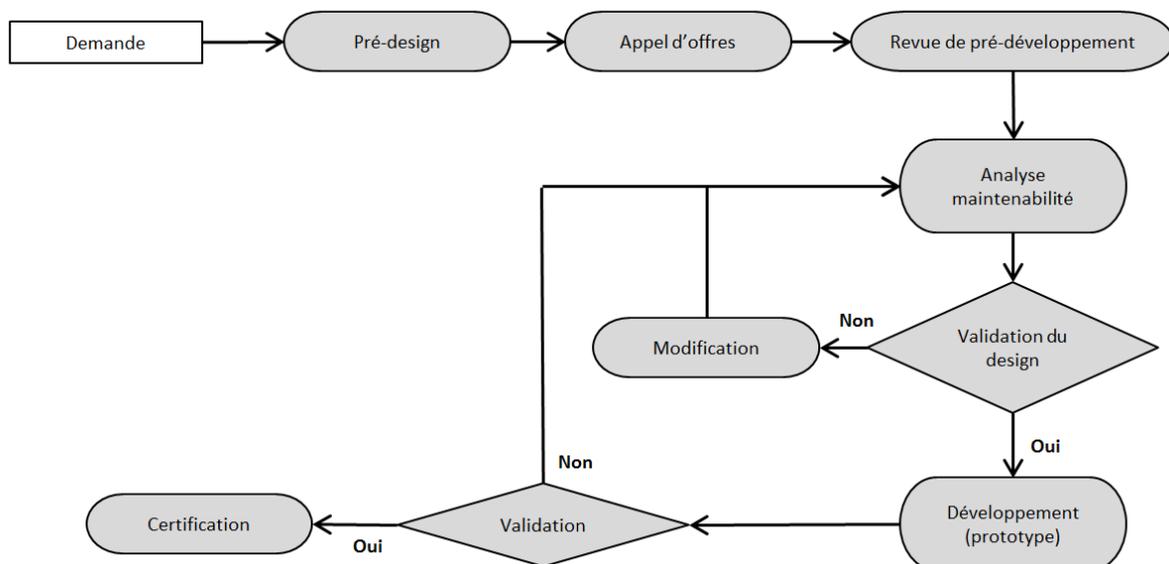


Figure 11 : Processus et étapes de conception associées en maintenabilité, provenant du département maintenabilité de l'entreprise d'accueil et confirmant les travaux de la littérature (Clarkson et Eckert, 2010). Il convient de noter que ce processus est générique et non confidentiel.

Le questionnaire, dans son format non confidentiel, est en annexe 1. Trois semaines ont été nécessaires pour réaliser la passation de chaque questionnaire d'une durée d'environ 45 minutes. Chaque partie du questionnaire ne dépassait pas 10 minutes, et la présence d'un spécialiste en facteur humain permettait de répondre aux éventuelles interrogations et de récolter des commentaires complémentaires et généraux.

3.2.2. Analyse de documents techniques

Afin de compléter nos premiers résultats basés sur les questionnaires semi-directifs, nous avons souhaité, avec les membres du groupe projet, conduire une étude approfondie des documents techniques émanant et publiés dans le département maintenabilité, découlant des analyses de maintenabilité. Par ailleurs nous avons également souhaité participer de façon active à divers projets en cours. En effet, le document technique formalise le travail de l'acteur-métier en maintenabilité, c'est-à-dire qu'il décrit les indicateurs analysés, les outils et méthodes déployés. Ces documents techniques sont intéressants à étudier car ils concernent très souvent des définitions et des descriptions concernant des actions et des résultats qui devront être compris et exploités par d'autres acteurs-métiers du département maintenabilité ou d'autres départements composants le bureau d'études (Ganier, 2018). Dans notre cas, l'analyse de ce type de document devrait pouvoir être le reflet des résultats de notre questionnaire semi-directif.

A travers divers projets techniques en maintenabilité, sur deux gammes d'hélicoptères différentes qui étaient en cours d'étude dans le département de la maintenabilité, une qualification et une quantification des indicateurs techniques utilisés liés à des exigences ergonomiques ont pu être réalisées. Egalement, dans notre analyse, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des outils utilisés par les ingénieurs-concepteurs et les techniciens pour approcher, évaluer la part prise par le facteur humain dans les tâches de maintenance. Cinq outils ont été ainsi recensés au travers de l'ensemble des documents étudiés qui mentionnaient clairement les outils de simulation utilisés : le modeleur numérique, le mannequin numérique, la réalité virtuelle, des maquettes physiques et les hélicoptères eux-mêmes.

De nombreuses méthodes existent pour analyser les documents techniques, les comparer entre eux (Bradford & Wnek, 2006). Dans notre cas, nous avons uniquement cherché à recenser les indicateurs étudiés, les outils de simulation utilisés afin de quantifier et d'observer d'éventuelles variations dans le contenu des différents documents étudiés. Cette étude exploratoire a été conduite grâce à la mise en place d'outils de suivi de projets, sous format numérique et mise à jour quotidiennement, permettant de cibler les zones d'études similaires entre les deux hélicoptères, l'analyse de documents techniques caractérisant les exigences de maintenabilité pour chaque appareil.

En accord avec le groupe projet, nous nous sommes focalisés sur deux hélicoptères différents sur lesquels nous avons observé les huit mêmes zones qui impliquent des tâches de maintenance régulières (moteur, soute, rotor arrière, poutre de queue ou encore radôme). Ce sont ainsi 16 zones, pour les deux hélicoptères, qui ont été observées. Des données techniques apparaissent dans les

documents de chaque zone et font notamment ressortir l'étude d'indicateurs. Ces zones ont été choisies pour deux raisons :

- Les documents et les études de maintenabilité associées entre les deux machines sont similaires ;
- Chaque zone implique des actions différentes (plancher mécanique, radôme, etc).

La figure 12 présente quelques-unes de ces zones :



3.3. Présentation des résultats

Rappelons que quinze personnes entre 20 et 39 ans, avec un âge moyen de 28,8 ($\pm 5,58$), ont été interrogées au sein du département maintenabilité. Parmi ce groupe, il y a 26% de techniciens et le reste, 74%, est représenté par des ingénieurs en maintenabilité. Ils sont tous spécialisés en maintenance et en maintenabilité aéronautique et plus particulièrement sur les hélicoptères. Pour la réalisation des analyses de maintenabilité, ils possèdent tous les connaissances techniques et déploient la même méthodologie. Ainsi, pour le reste des résultats évaluant le niveau de connaissance en facteur humain, nos analyses statistiques combineront les réponses des ingénieurs et des techniciens. Egalement, nous parlerons d'acteurs-métiers en maintenabilité pour enlever toute ambiguïté.

Nos résultats seront présentés sous plusieurs paragraphes dépendant de nos hypothèses H1 : le niveau de formation et le degré de connaissances en facteur humain ; H2 : le degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception.

3.3.1. Degré de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité

Premièrement, nous souhaitons connaître le niveau de formation en facteur humain de l'ensemble des personnes interrogées. Seul un acteur-métier confirme avoir suivi une formation en facteur humain au cours d'une formation interne à notre entreprise d'accueil. Cette formation assez courte puisque réalisée sur une matinée, se focalisait autour d'une approche généraliste du facteur humain, principalement centrée sur la composante physique de l'ergonomie et sur le bien-être au travail. Cependant, l'ensemble des sondés (100%) affirment qu'ils ont acquis une compétence et des connaissances, selon eux, en facteur humain, et en particulier en ergonomie, grâce à leur expérience de travail: 67% en ergonomie physique, 40% en ergonomie organisationnelle et seulement 7% en ergonomie cognitive. Nous remarquons également, à la question qui demandait de définir l'ergonomie, que seule la dimension physique apparaît de façon claire. On retrouve notamment une récurrence de mots clés : « posture », « interaction », « utilisation » ou encore « humain ».

Egalement, afin de supporter les analyses de conception, plusieurs outils de simulation sont utilisés. Ces outils servent de support à l'ingénieur pour tenter d'anticiper l'activité de l'opérateur de maintenance. La figure 13 qui suit, détaille la proportion d'utilisation de ces outils. Les outils de simulation sont présentés dans l'ordre d'apparition dans le processus de conception. Dans les premières étapes de ce processus de conception le modeleur et le mannequin numérique sont généralement les premiers utilisés, puis vient la maquette physique et la réalité virtuelle, qui dans notre contexte industriel sont souvent utilisées en parallèle. Notons que la question étant posée au début du questionnaire, elle ne tient donc pas compte des étapes qui composent l'ensemble du processus de conception. La maquette physique est l'outil de simulation le plus utilisé par 80% des acteurs de la maintenabilité pour évaluer la conception. La CAO (73,3%), la réalité virtuelle (66,7%) et le mannequin numérique (46,7%) étaient les autres outils de simulation les plus fréquemment utilisés dans le processus de conception. Une analyse de variance (ANOVA, à 1 facteur) a été réalisée avec les résultats bruts montrant qu'il n'y a pas de différence significative ($F=4.4$; $N=15$; $p=NS$) dans l'usage des différents outils de simulation.

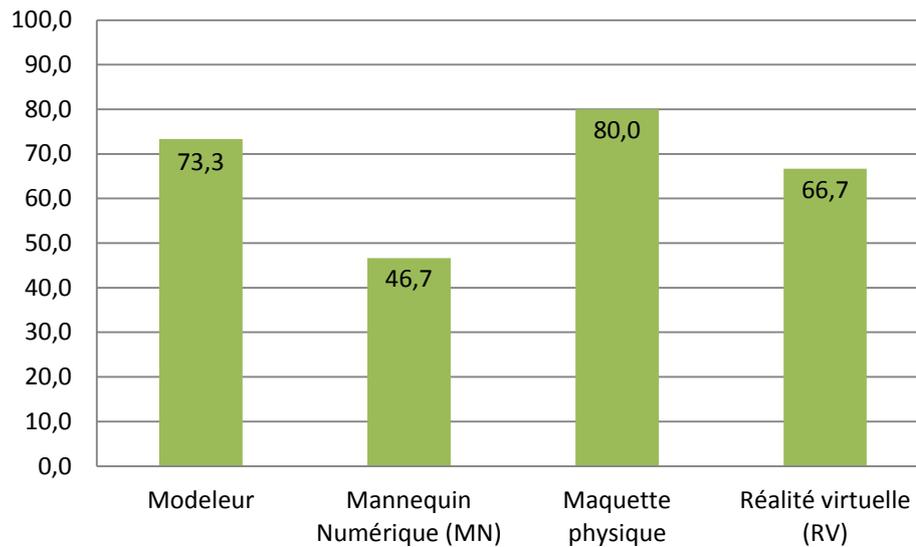


Figure 13 : Répartition et comparaison de l'usage des outils de simulation en % : modeleur, mannequin numérique, maquette physique et réalité virtuelle (NS). Anova à 1 facteur ne fait pas ressortir de différence significative dans les outils utilisés (F= 4.4, N=15, et p=NS).

Ces outils de simulation peuvent servir comme support à l'analyse de maintenabilité incluant une approche facteur humain. Ainsi, nous proposons dans un premier temps une vue macro avec un comparatif entre l'ensemble des critères ergonomiques et des outils associés, toutes catégories confondues (ambiance environnementale, physiques, organisationnelles, cognitif, sécurité au travail et enfin les caractéristiques des opérateurs/biométrie).

Le tableau 8 présente la prise en compte des critères ergonomiques et des outils associés par les acteurs-métiers. Nous avons comparé, toutes catégories confondues, la différence moyenne entre le pourcentage de critères étudiés et le pourcentage d'outils utilisés.

Chapitre 1 - Le facteur humain en maintenabilité

Tableau 8 : Moyenne de pourcentage des critères ergonomiques et des outils associés, le test de Mann-Whitney utilisé montre une différence significative entre critères et outils ($F=4.49$, $N=15$, $***p \leq .001$).

Catégorie de critères et d'outils	Critères	(%)	Outils pour étudier les critères	(%)
Ambiance environnementale	Qualité de l'air Luminosité Ambiance sonore Ambiance thermique Vibration	26.7 20.0 20.0 20.0 6.7	Mesureur de vibration	6.7
			Lux mètre	0.0
			Observation directe avec check-list standardisée	6.7
			Observation directe avec check-list personnalisée	13.3
			Observation vidéo avec check-list personnalisée	0.0
			Sonomètre	13.3
			Thermomètre, hygromètre	0.0
			Accéléromètre	0.0
			Dynamomètre	13.3
			Electromyogramme	0.0
Activité physique	Analyse du mouvement Effort/force Posture Durée de l'effort	53.3 86.7 80.0 33.3	Electrocardiogramme	6.7
			Equation révisée du NIOSH	6.7
			Goniomètre	0.0
			Observation directe avec check-list standardisée	33.3
			Observation directe avec check-list personnalisée	60.0
			Observation vidéo avec check-list personnalisée	6.7
			Analyse de l'activité (logiciel dédié)	0.0
			Capture de mouvements	13.3
			Chronomètre	6.7
			Observation directe avec check-list standardisée	33.3
Organisation du travail	Poste de travail Autonomie Sécurité aire de travail Formation Monotonie Répétitivité Durée de l'activité	13.3 20.0 40.0 13.3 6.7 20.0 26.7	Observation directe avec check-list personnalisée	0.0
			Observation vidéo avec check-list personnalisée	13.3
			Analyse de l'activité (logiciel dédié)	0.0
			Chronomètre	6.7
			Observation directe avec check-list standardisée	20.0
			Observation directe avec check-list personnalisée	13.3
			Analyse de l'activité (logiciel dédié)	13.3
Activité cognitive et sensorielle	Charge mentale Erreur humaine Latitude décisionnelle Champ visuel Compréhension du prescrit	0.0 46.7 6.7 46.7 0.0	Mesures psycho-physiologique (données biologique and électroencéphalographie)	0.0
			Questionnaire risques psycho-sociaux (Karasek)	6.7
			Questionnaire sur la charge mentale (Nasa-TLX)	6.7
			Checklist de sécurité & évaluation des risques	20.0
			Outils statistiques (analyser les rapports d'accidents du travail et des maladies professionnelles)	0.0
Santé et sécurité au travail	Accident du travail Doléances des opérateurs	20.0 33.3	Outils statistiques (comparer les sujets)	26.7
			Questionnaire	13.3
Caractéristiques des opérateurs	Anthropométrie Expérience	80.0 6.7	Trousse anthropométrique	0.0
			Total***	29.1±12.3

Le test de Mann-Whitney a montré une différence significative entre le pourcentage moyen de critères ergonomiques étudiés ($29,1 \pm 12,3$) et les outils associés ($10,3 \pm 6,3$) utilisés pour les évaluer ($F=4.49$, $N=15$, $p \leq 0,001$). En moyenne, $63,3\%$ ($\pm 12,3$) des acteurs-métiers en maintenabilité ont étudié des critères d'activité physique, $18,7\%$ ($\pm 3,6$) des critères d'ergonomie environnementale et 20% ($\pm 5,5$) des critères d'organisation du travail (tableau 2). Les critères les plus étudiés par les ingénieurs concernent la posture (80%) et l'effort ($86,7\%$) dans la catégorie d'activité physique et le critère d'anthropométrie (80%) dans la catégorie des caractéristiques opérateurs. Les acteurs-métiers ont principalement étudié les situations de travail par observation directe en s'aidant d'une check-list, soit de standards tel que RULA (McAtamney & Corlett, 1993) ou l'équation révisée du Niosh (Waters et al., 1993) soit encore une check-list prédéfinie par l'acteur métier lui-même sans concertation avec un expert en facteur humain. Ce dernier outil a été majoritairement exploité par 60% des sondés pour évaluer les critères physiques touchant particulièrement les collisions avec l'environnement et le ressenti de l'accessibilité. De manière individuelle, la plupart des acteurs-métiers ont utilisé moins de 20% des outils, quelle que soit leur catégorie, et $32,4\%$ d'entre eux n'ont utilisé aucun outil. Cependant, nos résultats montrent qu'une grande variété de critères est étudiée (23 sur 25 ; 92%), et que divers outils sont utilisés (23 sur 35 ; $65,7\%$) pour explorer ces critères, mais que seulement une minorité d'acteurs-métiers ont étudié les critères et appliqué les outils associés ($29,1\% \pm 12,3$ pour les critères et $10,3\% \pm 6,3$ pour les outils).

L'observation que nous venons de porter est globale, c'est-à-dire qu'elle touche tous les critères et outils confondus. Afin d'affiner notre regard, nous nous sommes proposés de faire un comparatif pour chaque catégorie. Ainsi, nous avons cherché à identifier la qualité de prise en compte de chacun des critères étudiés et de chaque outil utilisé pour chaque catégorie de critères. Tout d'abord, nous avons remarqué qu'à l'intérieur des trois catégories, plus de 50% des critères sont étudiés — activité physique ($78,6\%$ des critères sont étudiés), la santé au travail ($57,1\%$) et les caractéristiques des opérateurs (55%). Pour compléter notre étude, nous avons donc comparé, dans chaque catégorie, la différence moyenne entre le pourcentage des critères étudiés et le pourcentage des outils utilisés. Plus précisément, nous avons comparé les critères moyens et les outils utilisés par les membres de la population ayant affirmés qu'ils avaient étudié les catégories associées. Le tableau 9 et la figure 14 décrivent les résultats obtenus :

Tableau 9 : Détails des données permettant de réaliser le test t-student. N correspondant au nombre d'acteurs-métiers utilisant les critères et outils associés pour chacune des catégories.

Nom des catégories	N	Moyenne (en %)	Écart type (en %)
Critère Environnemental	6	46,7	24,2
Outil Environnemental		14,3	12,8
Critère physique	14	78,6	28,1
Outil physique		13,0	9,2
Critère organisationnel	10	33,8	13,2
Outil organisationnel		16,0	15,8
Critère cognitif	10	30,0	10,5
Outil cognitif		20,0	21,1
Critère sécurité au travail	7	57,1	18,9
Outil sécurité au travail		14,3	24,4
Critère biométrique	10	55,0	15,8
Outil biométrique		13,3	17,2

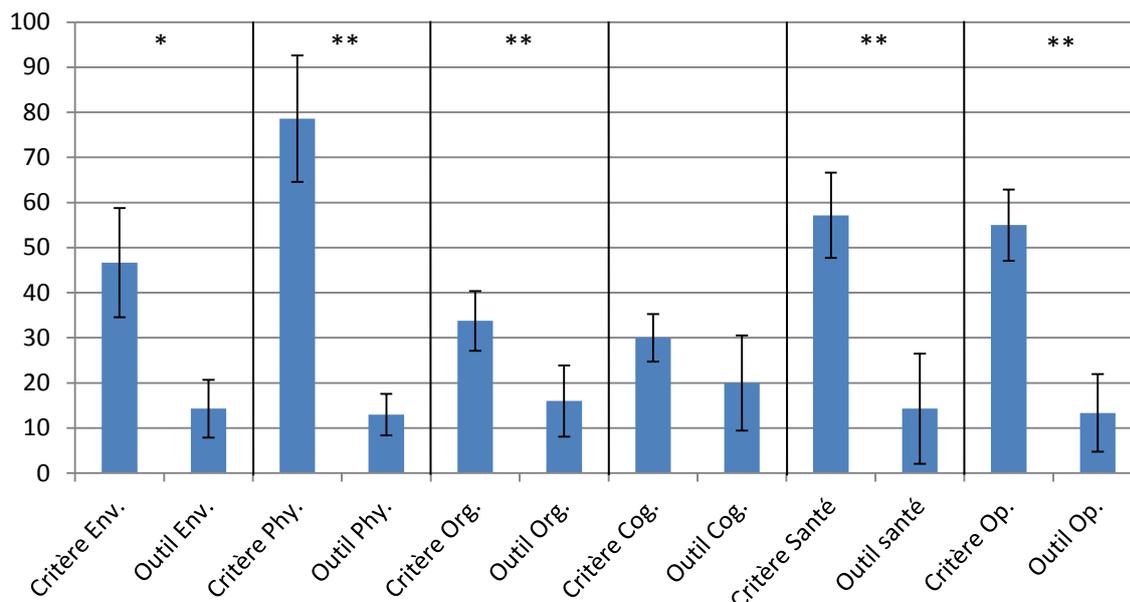


Figure 14 : Moyenne de pourcentage entre les critères ergonomiques étudiés et les outils associés (*p < 0.05; ** p < 0.01).

Le test « t-student » montre des différences significatives des moyennes obtenues dans cinq catégories parmi les six. Nous notons notamment des différences entre les critères ergonomiques étudiés et les outils utilisés dans le département de maintenabilité: ambiance environnementale ($t(5) = 2,89; p \leq 0,05$), l'activité physique ($t(13) = 8,75; p \leq 0,01$), l'organisation de l'activité de travail ($t(9) = 3,66; p \leq 0,05$), la santé au travail ($t(6) = 6,00; p \leq 0,01$) et la prise en compte des caractéristiques de l'opérateur ($t(9) = 5,00; p \leq 0,01$). En effet, les résultats descriptifs indiqués dans le tableau 9 montrent que, dans chaque catégorie, moins de 20% des outils sont utilisés par les acteurs-métiers, alors que plus de 30% des critères sont étudiés. Plus précisément, dans les trois catégories, à savoir les caractéristiques des opérateurs, l'activité physique et la santé, plus de 50% des critères sont étudiés, atteignant 79% pour l'activité physique. Par conséquent, nos résultats mettent en évidence qu'une grande variété de critères est étudiée, mais seulement quelques outils sont réellement utilisés pour explorer ces critères.

La différence de moyenne la plus importante entre les critères ergonomiques étudiés et les outils utilisés se trouve dans la catégorie de l'activité physique. En effet, 79% des critères de cette catégorie sont étudiés, mais seulement 13% des outils liés à cette catégorie sont utilisés. Nous avons exploré plus précisément les différents outils utilisés. Les résultats sont illustrés dans la figure 15. Nos résultats montrent que seuls deux outils sont réellement utilisés par la majorité des acteurs-métiers de maintenabilité: observation directe avec grille personnelle et/ou observation directe avec une grille standard. En effet, la grille personnelle lors d'une observation directe est utilisée par 54% de la population. Pour 34% des acteurs-métiers, la grille est basée sur des normes. D'autres outils sont utilisés par une ou deux personnes pour évaluer les efforts. En revanche, trois outils, tels que l'accéléromètre, le goniomètre, l'électromyogramme et le logiciel dédié à l'analyse de l'activité pour décomposer les séquences de travail ne sont pas utilisés. Dans les autres catégories, les résultats sont similaires. Il apparaît clairement que les outils qui sont actuellement utilisés sont essentiellement des grilles personnalisées, quels que soient les critères étudiés.

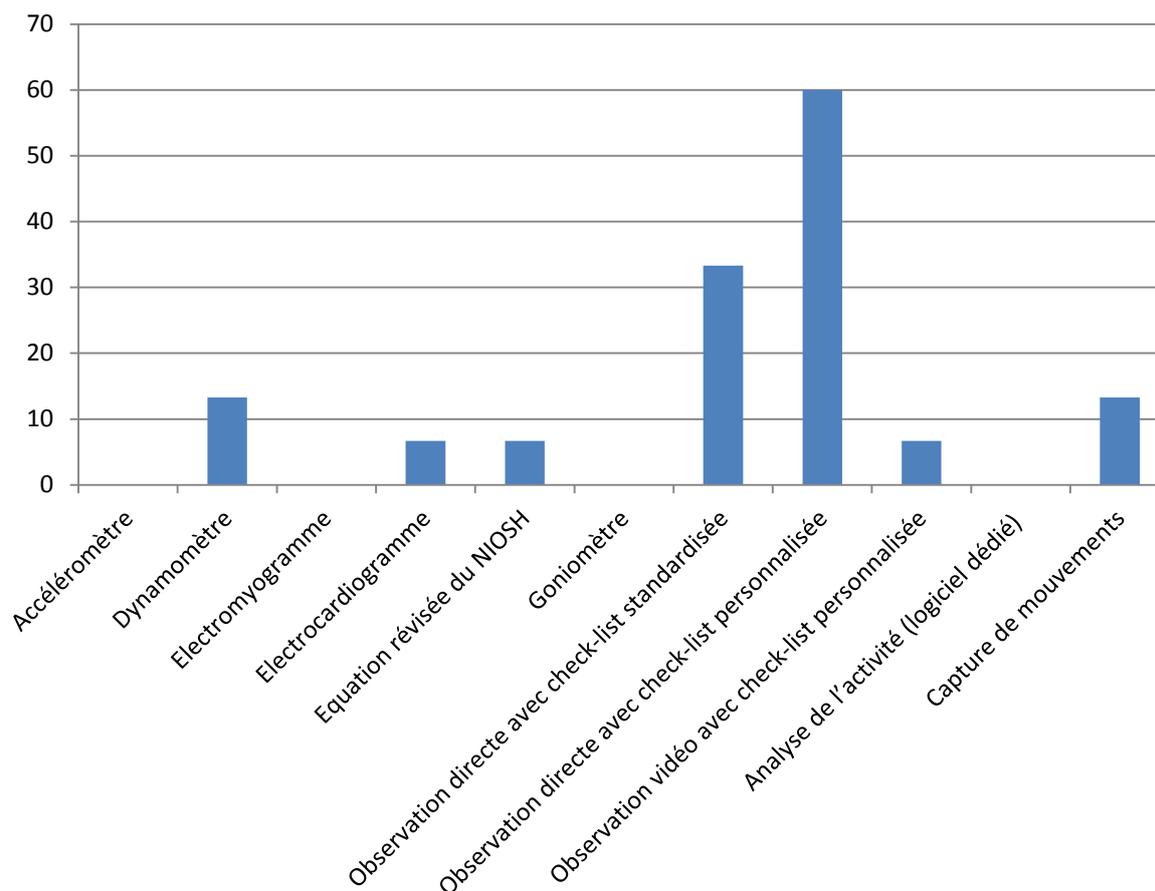


Figure 15 : Pourcentage des outils ergonomiques dans la catégorie de l'activité physique montrant la disparité des usages. Les grilles d'analyses personnalisées sont les plus utilisées tandis que les outils nécessitant une formation dédiée en facteur humain, tels que le goniomètre et l'électromyogramme, ne sont pas utilisés.

Afin d'appuyer nos résultats, nous nous sommes également proposés, comme déjà évoqué, de conduire une analyse approfondie des documents techniques rédigés et diffusés par le département de maintenabilité. En effet, les analyses de maintenabilité incluant une approche facteur humain sont formalisées à travers des documents techniques qui peuvent donc servir de base à une analyse terrain. Deux gammes différentes d'hélicoptères ont été retenues car disponibles et étudiées, et pour chacune d'elles, les 8 mêmes zones ont été observées. Ces zones ont été sélectionnées par la récurrence des actions de maintenance à réaliser, signifiant que les analyses de maintenabilité menées sont les plus complètes et les plus abouties.

En premier lieu, à travers les documents techniques, nous observons l'utilisation de quatre indicateurs : accessibilité, désassemblage, interchangeabilité et tribologie (frottement/contact entre les pièces et outils). La figure 16 montre la répartition d'apparition de chacun des indicateurs à travers l'ensemble des 16 documents étudiés. Nous observons une différence significative entre chaque indicateur (ANOVA à 1 facteur, $F=14,7$, $N=16$, $p \leq 0.001$). Seule l'accessibilité est utilisée de façon systématique dans les 16 documents (100%) par les équipes de concepteurs quel que soit le contexte de l'étude et de l'environnement associé. Le désassemblage est également étudié dans des proportions importantes (62.5%) alors que l'interchangeabilité et la tribologie le sont plus sporadiquement, allant de 25% pour l'un et 18.8% pour l'autre.

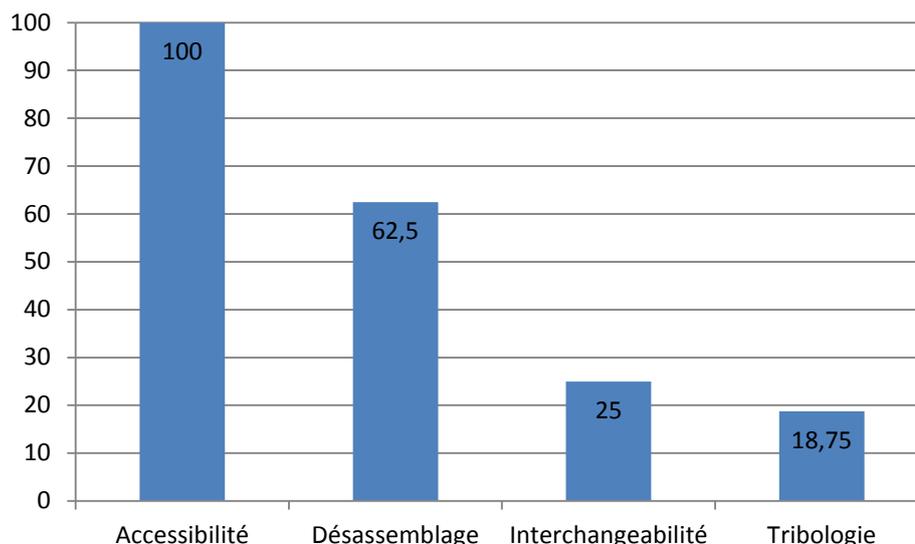


Figure 16 : Pourcentage de prise en compte de chacun des quatre indicateurs à travers l'ensemble des 16 documents techniques étudiés. Une Anova à 1 facteur fait ressortir une différence significative entre les indicateurs ($F= 14,7$, $N=16$, et $p\leq.001$)

Ces documents techniques expliquent notamment à travers quel outil de simulation a été réalisée l'analyse de maintenabilité. Nous avons pu alors identifier les outils de simulation utilisés pour chacun des indicateurs mentionnés. Comme l'indique le tableau 10, dès qu'une analyse est conduite, l'accessibilité est toujours présente et étudiée, quel que soit l'outil de simulation. Nous remarquons également que l'hélicoptère réel est utilisé et d'ailleurs c'est le seul « outil » où l'on voit apparaître dans l'analyse les quatre indicateurs. Evidemment, lorsqu'il est utilisé nous ne sommes plus dans des phases préliminaires mais bien sur un produit abouti, qui a déjà été testé en vol voire même déjà été livré chez les compagnies aériennes. Il y a donc une notion d'adéquation entre l'outil de simulation utilisé, les indicateurs étudiés et le processus de conception. Nous reviendrons sur cette notion dans la partie suivante.

Tableau 10 : Outils de simulation (modeleur, Mannequin Numérique (MN), Réalité Virtuelle (RV), Maquette physique (MP) et Hélicoptère réel (Héli)) et indicateurs pris en compte et étudiés chez un hélicoptériste.

Indicateurs de maintenabilité	Outils de simulation				
	Modeleur	MN	RV	MP	Héli
Accessibilité	100%	100%	100%	100%	100%
Désassemblage	12.5%	0	0	0	50%
Interchangeabilité	0	0	0	0	25%
Tribologie (interaction des interfaces)	6.3%	0	0	6.3%	6.3%

Pour affiner notre étude, avec l'aide des documents techniques et des échanges avec les acteurs-métiers du département, nous avons identifié les outils d'évaluation ergonomiques utilisés pour chaque zone étudiée en fonction des outils de simulation. Il apparaît que seulement deux outils sont réellement utilisés : une check-list spécifique construite à chaque fois pour le projet et ponctuellement l'usage de l'outil RULA, comme cela est proposé par d'autres entreprises en accord avec les travaux de Di Gironimo, et al. (2004). Cette check-list se focalise essentiellement sur les collisions ou encore le champ de vision lors d'une action de maintenance. Une analyse plus détaillée

des documents met notamment en évidence que le champ de vision est étudié, grâce au mannequin numérique, mais en aucun cas il est défini comme un indicateur à part entière dans les documents techniques. Le champ de vision s'inscrit, en fait, dans une analyse plus globale qui prend en compte plusieurs indicateurs comme l'accessibilité physique. L'analyse finale fait ressortir uniquement quatre indicateurs quantifiés précisément, à savoir l'accessibilité, le désassemblage, l'interchangeabilité et la tribologie. Cependant, ces résultats doivent être nuancés ; en effet l'étude de maintenabilité a porté également sur d'autres dimensions, mais qui n'ont pas été relevées et qualifiées de manière objective. Ainsi de nombreuses analyses et réflexions sont menées par les ingénieurs-concepteurs au regard de leurs expertises mais ne reposent pas sur une quantification précise et/ou sur l'utilisation d'indicateurs. Par ce constat, nous pouvons alors comprendre pourquoi le questionnaire fait ressortir davantage d'indicateurs que ceux réellement formalisés et diffusés dans l'ensemble du bureau d'études. Nous pouvons ainsi dire que les études du facteur humain menées par les acteurs-métiers en maintenabilité sont réalisées sans réel support, réelle méthode ni résultat défini. La grande majorité des résultats communiqués entre les différents bureaux d'études sont capitalisés un peu de façon intuitive.

Il est également intéressant de noter la présence, dans les documents techniques, d'un indicateur de temps pour la réalisation de la tâche. Ce temps est estimé en questionnant les opérateurs de maintenance. Ce sont eux qui donnent une estimation et non l'acteur-métier en maintenabilité qui pourrait s'appuyer sur un outil de simulation numérique ou d'un essai sur une maquette physique voire à partir d'un hélicoptère réel. Dans d'autres études, la méthode MTM (Mean Time Measurement) (Laring et al., 2002) est utilisée afin d'estimer le temps théorique de chacune des tâches et sous-tâches composant l'activité de maintenance étudiée.

3.3.2. Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception

Dans cette deuxième partie des résultats nous cherchons à connaître le degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception de maintenabilité, défini par l'entreprise, composé de neuf étapes que nous avons déjà présentées. Pour chacun des membres du département de maintenabilité interrogé, deux questions en rapport avec la figure du processus étaient posées. Chacun devait dissocier, pour chaque étape définie, la manière dont il exploitait le facteur humain : soit en faisant une analyse dédiée, soit en collaborant avec les autres départements impactés par la conception du système étudié. Il ressort, tout d'abord, qu'à travers nos deux propositions, quatre façons de faire apparaissent dans leur pratique, à savoir :

- Les acteurs-métiers en maintenabilité n'ont effectué ni analyse, ni collaboration autour des dimensions relevant du facteur humain : les ingénieurs et les techniciens n'appliquent donc aucune approche du facteur humain dans le processus de conception de maintenabilité ;
- Les acteurs-métiers en maintenabilité effectuent une étude ergonomique: les ingénieurs et les techniciens appliquent une approche « techno-centrée » et moins

anthropocentrée pour réaliser l'analyse de maintenabilité, focalisant ainsi leurs études sur comment l'opérateur de maintenance pourrait s'adapter à l'environnement et non comment l'architecture pourrait s'adapter à son activité ;

- Les acteurs-métiers en maintenabilité collaborent : les ingénieurs et les techniciens collaborent et échangent souvent au cours de réunion, voire d'échanges téléphoniques avec les autres départements, sans faire d'étude ergonomique ;
- Les acteurs-métiers en maintenabilité réalisent à la fois une étude ergonomique et des collaborations: les ingénieurs et les techniciens effectuent l'étude ergonomique et collaborent / échangent ensuite avec les autres membres des départements impactés par l'étude en cours d'analyse.

Le tableau 11 indique le niveau d'intégration du facteur humain dans le processus de conception. Le test de Fisher a montré l'existence d'une relation statistiquement significative entre l'étude ergonomique et la collaboration pour seulement une seule étape, appelée la revue de pré-développement. En effet, au cours de cette étape, les résultats ont révélé que 46,7% des ingénieurs et des techniciens effectuaient à la fois une étude ergonomique et une collaboration entre acteurs-métiers, tous métiers confondus.

Egalement, nous remarquons que pour l'étape de validation de la conception 40% des ingénieurs et des techniciens ont effectué UNIQUEMENT une étude ergonomique et seulement 33,3% ont collaboré avec d'autres départements. Seulement 26% des ingénieurs et des techniciens ont effectué une étude ergonomique ET une collaboration avec les autres acteurs-métiers du bureau d'études lors de l'étape de validation (tableau 11).

Tableau 11 : Distribution de la réalisation d'étude ergonomique, de collaboration, d'étude ergonomique et de collaboration au cours de chacune des étapes du processus de conception de maintenabilité défini au sein de notre entreprise pilote. Le test de Fisher a été utilisé pour étudier les relations entre les distributions, et l'étape de revue de pré-développement ressort seule avec une relation significative entre l'étude ergonomique et la collaboration (N=15 ; ** p< .01).

Etapas du processus	Etude ergonomique	Collaboration	Etude ergonomique & collaboration	Ni étude ergonomique ni collaboration
	N (en %)	N (en %)	N (en %)	N (en %)
Pré-design	2 (13,3)	2 (13,3)	4 (26,7)	7 (46,7)
Appel d'offres	0 (0)	0 (0)	1 (6,7)	14 (93,3)
Revue de pré-développement**	0 (0)	0 (0)	7 (46,7)	8 (53,3)
Analyse maintenabilité	3 (20)	1 (6,7)	3 (20)	8 (53,3)
Validation du design	6 (40)	5 (33,3)	4 (26,7)	0 (0)
Modification	3 (20)	0 (0)	1 (13,3)	10 (66,7)
Développement (Prototype)	4 (26,7)	1 (6,7)	1 (13,3)	8 (53,3)
Acceptation / Validation	1 (6,7)	0 (0)	2 (13,3)	12 (80)
Certification	1 (6,7)	0 (0)	0 (0)	14 (93,3)

La figure 17 montre le niveau d'intégration du facteur humain, toutes approches confondues (étude ergonomique uniquement, collaboration uniquement, et étude ergonomique & collaboration) aux cours des différentes étapes du processus de conception. Nos résultats montrent un pourcentage élevé de non-intégration du facteur humain lors de l'appel d'offres (93,3%), de l'acceptation / validation (80%) et de la qualification (93,3%).

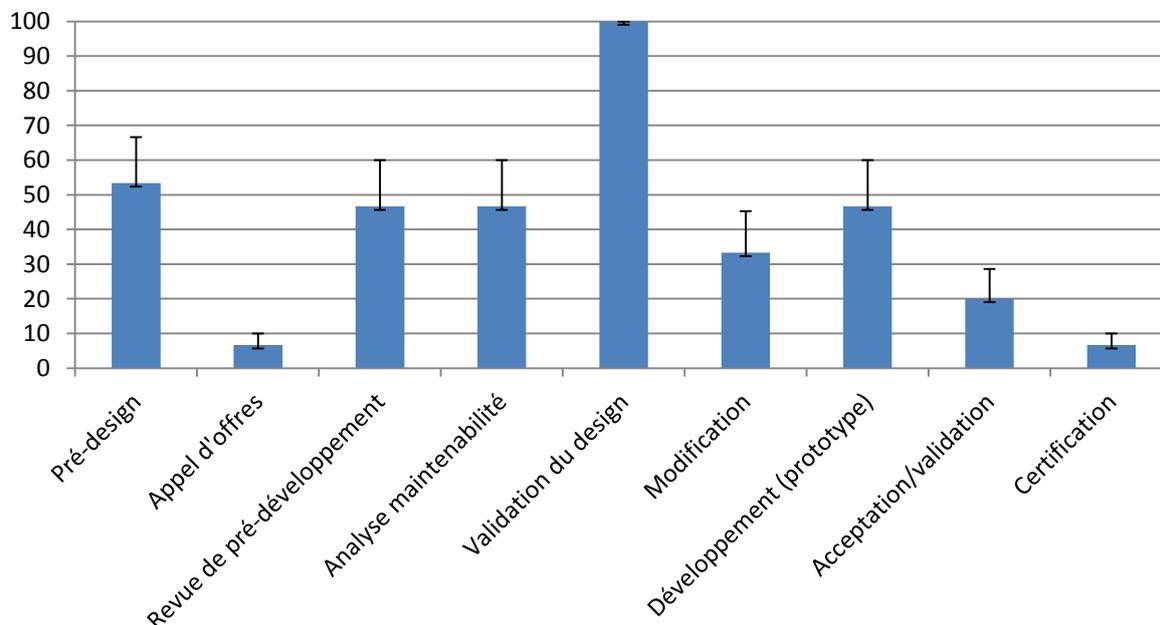


Figure 17 : Pourcentage d'intégration du facteur humain, toutes approches confondues (étude ergonomique, collaboration et étude ergonomique & collaboration), pendant chacune des étapes du processus de conception de maintenabilité défini au sein de notre entreprise pilote. Le test de Cochran (Q) montre des différences significatives entre chaque étape ($p \leq 0,05$).

Le test de Cochran (Q) conduit entre les différentes étapes du processus de conception montre une différence significative concernant le niveau d'intégration de l'ergonomie (valeurs $p \leq 0,05$) traduisant des pratiques non standardisées dans l'intégration du facteur humain entre les différentes étapes du processus de conception.

4. Discussion

La maintenance est considérée comme une activité complexe, exigeant une organisation modulable en fonction des besoins, des ressources matérielles et humaines. L'aéronautique, comme d'autres secteurs du transport, possède des contraintes particulièrement sévères en termes de sécurité et de santé. Afin de simplifier l'activité de maintenance pour la rendre efficace et acceptable en termes d'activités de travail, une nouvelle entité au sein même des bureaux d'études est née : la maintenabilité. Elle vise à anticiper l'activité de maintenance dès les premières étapes de conception, en étroite collaboration avec l'ensemble du bureau d'études. Cependant, cette entité voit ses activités qualifiées de « techno-centrées » puisque ses analyses sont focalisées essentiellement autour de la dimension technique sans tenir compte réellement de l'activité de l'opérateur de maintenance. De plus ses activités sont gérées uniquement par des ingénieurs et des techniciens en maintenabilité n'ayant que peu, voire pas, de formation spécifique au facteur humain

et en particulier en ergonomie. Ainsi, la problématique générale qui se pose aujourd'hui est comment mieux intégrer le facteur humain dans les pratiques des personnes travaillant en maintenabilité afin d'améliorer l'activité future des opérateurs de maintenance comme nous avons pu le montrer dans les parties précédentes. Notre contribution était donc d'abord de mieux «*Comprendre au sein d'une entreprise pilote relevant de l'aéronautique, les pratiques mises en place pour intégrer le facteur humain en maintenabilité*». Tout en s'appuyant sur l'état de l'art, notre analyse s'est réalisée à partir d'une observation industrielle en deux étapes : un questionnaire semi-directif et l'analyse de documents techniques. Nous présentons ainsi dans la partie qui suit une analyse et une discussion des résultats du chapitre I.

4.1. Degré de connaissance en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité

Afin de bien comprendre comment les analyses en facteur humain sont menées au sein du département maintenabilité, nous avons réalisé une observation conduite au sein même d'un industriel, constructeur d'hélicoptères. Nous avons déployé un questionnaire semi-directif auprès des acteurs-métiers d'un département de maintenabilité aéronautique. Nous avons également étudié des documents techniques, rédigés par ces mêmes acteurs-métiers, formalisant les exigences ergonomiques considérées comme essentielles et donc partagées à travers l'ensemble des entités composant le bureau d'études. Nos résultats montrent d'abord que l'ensemble des acteurs-métiers, comprenant aussi bien les ingénieurs que les techniciens du département maintenabilité, n'ont pas de formation dédiée au domaine du facteur humain. Nous remarquons cependant que ces acteurs-métiers ont une réelle volonté de prendre en compte le facteur humain dans leurs projets. Nos résultats montrent en effet qu'une grande variété de critères est étudiée et que divers outils associés sont utilisés, mais que très peu d'acteurs-métiers en maintenabilité appliquent une réelle démarche d'analyse ergonomique. Plus précisément, nos résultats montrent qu'une grande variété de critères est étudiée (23 sur 25; 92%), et que divers outils sont utilisés (23 sur 35; 65,7%) pour explorer ces critères, mais que seulement une minorité d'acteurs-métiers ont étudié les critères et appliqué les outils associés (29,1% \pm 12,3 pour les critères et 10,3% \pm 6,3 pour les outils). Egalement, si nous regardons en détail nos résultats, nous observons que la composante physique est la plus largement étudiée avec presque 80% des critères ergonomiques mais seulement 13% des outils associés, laissant suggérer une grande subjectivité dans l'analyse produite par les acteurs-métiers en maintenabilité. Ainsi, le facteur humain semble être intégré uniquement grâce à leurs propres expériences et intuitions - sans aucune méthode systématique. De plus, certains outils d'ergonomie utilisés nécessitent un savoir et savoir-faire que les acteurs-métiers n'ont pas, n'ayant pas suivi de formations dédiées. De plus, nous observons que la prise en compte de l'ergonomie physique par les acteurs-métiers en maintenabilité se fait essentiellement avec l'aide d'outils de simulation numériques et physiques. Ainsi, le mannequin numérique est utilisé par 46,7% des acteurs-métiers, la réalité virtuelle par 66,7% et l'hélicoptère réel par 80%.

L'approche mise en place par les acteurs-métiers n'intègre pas l'ensemble des composantes de l'ergonomie telles que définies par l'IEA (2000). Or, l'approche conduite s'intéressant essentiellement à l'ergonomie physique, connue pour s'appuyer essentiellement sur les normes et

standards ergonomiques à l'image de l'analyse des postures, des efforts, de l'anthropométrie...ne permet pas de prendre en compte l'ergonomie cognitive et organisationnelle. Ces trois composantes (physiques, cognitives et organisationnelles) sont pourtant indispensables à toutes analyses du facteur humain, plus particulièrement celles touchant l'ergonomie qui définissent bien ces trois composantes comme complémentaires (IEA, 2000 ; Falzon, 2004). De plus, en maintenabilité, les composantes organisationnelles et cognitives sont bien présentes, comme le rappelle l'étude de Misra et al., 2008, détaillant l'activité de maintenance comme physiquement pénible avec une charge cognitive parfois élevée, associée à une organisation complexe et imprévisible. L'étude de Zafiharimalala & Tricot, 2009, suggère également une meilleure prise en compte de l'opérateur dans la conception de documents de maintenance pour supporter l'organisation mise en place dans les ateliers de maintenance mais également pour l'épauler dans la mémorisation des nombreuses activités qu'il doit mener chaque jour. Ainsi, les analyses actuellement conduites en maintenabilité sont partielles et ne considèrent pas totalement les savoirs et savoir-faire des opérateurs. L'activité des opérateurs est réduite à une suite d'opérations élémentaires sans prendre en compte les habitudes, l'expertise, les connaissances, les compétences des opérateurs, les variabilités d'environnements physiques, les caractéristiques sociales et culturelles dans lesquelles l'activité de maintenance se déroulera.

Cependant, la littérature scientifique confirme la nécessité de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité pour gagner en fiabilité, en sécurité, en temps et en coût ainsi que pour sauvegarder la santé des opérateurs concernés (AFIM, 2004 ; Misra, 2008). Nos résultats expérimentaux sont cohérents avec la littérature scientifique. Ainsi, le tableau 1 a pu montrer que le facteur humain est bien pris en compte en maintenabilité mais à travers une approche relevant uniquement de l'ergonomie physique, c'est-à-dire évaluant principalement les gestes, les postures, les dimensions corporelles,... lors des analyses touchant l'accessibilité, la facilité à désassembler et à assembler... (Moreu De Leon et al., 2012). En effet, que ce soit en aéronautique, ou dans le domaine de l'automobile, voire dans l'industrie en générale, les études de maintenabilité, ne laissent que peu de place à l'analyse de l'activité de travail, au sens comportement, traitement de l'information, prise de décisions,... des opérateurs de maintenance.

Egalement, tout comme nos résultats ont montré que les ingénieurs et techniciens en maintenabilité utilisaient les outils de simulation pour évaluer l'ergonomie physique, la littérature scientifique fait le même constat. Par exemple, dans le secteur de l'aéronautique, les études montrent une forte utilisation des modeleurs, des mannequins numériques et de la réalité virtuelle, pour évaluer essentiellement l'accessibilité et les collisions associées, le champ de vision et ponctuellement les efforts via la méthode RULA que proposent certains modeleurs comme CATIA V5 (Yongsheng & Liu, 2012 ; Rice, 2004 ; Marzano et al., 2015 ; Amoundarain et al., 2004). Dans le secteur automobile, on observe principalement des travaux liés à l'évaluation de l'accessibilité mais également de l'assemblage/désassemblage. Ces approches regardent notamment les interactions avec l'environnement (De Sa & Zachmann, 1999 ; Di Gironimo et al., 2004). Des études se sont également penchées sur l'industrie courante avec la maintenance des machines-outils. La littérature, toujours à travers les outils de simulation numériques et plus particulièrement la réalité virtuelle, tente d'évaluer les collisions ou encore l'assemblage (Regazzoni & Rizzi, 2014 ; Seth et al., 2011).

Dès lors, l'efficacité et la fiabilité des résultats obtenus au titre des analyses ergonomiques conduites peuvent être mises en question ainsi que nous avons pu déjà l'écrire (Bernard et al., 2017 ; 2019). Broberg (2007), analysant les travaux conduits chez une vingtaine d'industriels relevant de l'électronique, de la chimie et de la construction, a révélé le manque de temps, de connaissances sur l'environnement de travail ainsi que de méthodes comme principales contraintes à l'intégration du facteur humain, et donc de l'ergonomie, dans leurs activités. Les résultats de cette étude sont proches de nos observations, en particulier des méthodes et outils associés déjà connus, mais réellement sous-utilisés par les acteurs-métiers. Il apparaît, en effet, que les acteurs-métiers de la maintenabilité simulent l'activité de maintenance à travers plusieurs outils de simulation (maquette physique, réalité virtuelle ou encore mannequin numérique) à des fins d'approche du facteur humain, mais il ressort peu de résultats probants par manque de compétences et de connaissances, à la fois en ergonomie, mais aussi des outils de simulation utilisés, en accord avec les travaux de la littérature (Regazzoni & Rizzi, 2014; De Sa & Zachmann, 1999). Les outils de simulation, utilisés aussi bien par les acteurs-métiers et les ergonomes, devraient normalement constituer une base solide pour mieux intégrer le facteur humain (Sharma et al., 2018; Sagot et al., 2003; Chitescu et al., 2003; Lorrison, 2010). Des études antérieures ont d'ailleurs montré que les outils de simulation sont efficaces pour couvrir toutes les catégories d'indicateurs tels que les facteurs organisationnels, économiques et techniques. Ils permettent aux acteurs-métiers d'intégrer le facteur humain très tôt dans le processus de conception dès lors qu'ils possèdent un minimum de connaissances en ergonomie (De Leon et al. 2012; Perez et Neumann, 2010).

Ainsi, nos résultats, qui confirment ceux de la littérature, mettent en évidence que :

- La volonté d'intégrer le facteur humain en maintenabilité est bien réelle mais se limite souvent à l'ergonomie physique ;
- Les outils de simulation numériques et physiques restent assez peu exploités pour étudier l'intégration du facteur humain dans toutes ses dimensions (physiques, cognitives et organisationnelles) en maintenabilité, faute de connaissances des acteurs-métiers en ergonomie.

Ainsi, ces différentes analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse H1 : « l'absence de connaissances en facteur humain ne permet pas aux acteurs-métiers en maintenabilité d'intégrer efficacement le facteur humain dans les projets qu'ils conduisent ».

4.2. Degré d'intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception

Cette étude visait à déterminer si le facteur humain, à travers l'ergonomie, est pris en compte dans le processus de conception de la maintenabilité dans une industrie aéronautique pilote. Nous entendons par processus, l'ensemble des étapes qui le compose. Il est ainsi composé de neuf étapes provenant de notre entreprise d'accueil et reste générique, non confidentiel et connu de tous car

décrivant bien les étapes du processus que doivent suivre chaque acteur-métier en maintenabilité. Nous retrouvons par exemple les étapes de pré-développement, d'analyse de maintenabilité ou encore de validation du design. Ce processus a l'avantage de fournir une représentation rapide et précise de chaque étape composant le processus de conception du département de maintenabilité. Nous avons retenu l'hypothèse que les acteurs-métiers de maintenabilité intègrent le facteur humain selon deux possibilités : (1) la réalisation d'une étude ergonomique et/ou (2) la collaboration avec d'autres départements pour échanger et parvenir à un compromis entre les critères techniques et les exigences ergonomiques tout au long du processus de conception. A partir d'un questionnaire semi-directif, chaque acteur-métier du département maintenabilité devait indiquer, pour chaque étape du processus, comment il intégrait le facteur humain sur la base des deux hypothèses ci-dessus rappelées. Les résultats du questionnaire ont ainsi montré quatre types de comportement : aucune étude ergonomique et ni collaboration ; étude ergonomique uniquement ; collaboration uniquement avec d'autres départements ; étude ergonomique et collaboration. Il ressort ainsi une forte disparité dans les méthodes déployées par les acteurs-métiers pour réaliser ou non une approche du facteur humain pendant les analyses de maintenabilité. Les analyses statistiques ont mis en évidence une relation significative entre l'analyse ergonomique et la collaboration uniquement pour l'étape de la revue de pré-développement. En d'autres termes, pour l'étape citée, si un acteur-métier effectue une analyse ergonomique ; il collabore dès lors avec d'autres départements. Ce résultat montre, concernant notre département, une réelle volonté de convaincre les autres départements du bureau d'études lors des collaborations multi-métiers en valorisant les analyses ergonomiques préalablement réalisées. La littérature désigne d'ailleurs cette étape comme cruciale dans le processus de conception (Blanchard, 2014) car les spécifications techniques d'un hélicoptère sont déterminées et validées dans cette étape en fonction des besoins initiaux du cycle de vie du produit (politique générale et normes associées). Cela pourrait être la principale raison pour laquelle les acteurs-métiers intègrent plus « sérieusement » le facteur humain pendant cette étape du processus, bien que le niveau d'intégration reste encore faible, car ne dépassant pas la moitié de l'effectif impliqué au sein du département. Notons également que, l'ergonomie a été intégrée dans une autre étape déterminante, celle qui touche la validation de la conception, qui est une jonction entre les étapes préliminaires du développement de la conception et l'étape de fabrication. Dans cette étape, tous les acteurs-métiers de la maintenabilité (100%) ont utilisé au moins une des trois approches permettant d'intégrer l'ergonomie (43% ont effectué uniquement des analyses ergonomiques, 33,3% seulement des collaborations et 26,7% ont réalisé une analyse suivie d'une collaboration). Ce résultat suggère que la volonté d'intégrer le facteur humain reste forte mais qu'aucune méthodologie n'est réellement mise en place pour permettre une approche homogène, cohérente entre chaque acteur-métier en maintenabilité. D'ailleurs, si nous observons l'ensemble du processus de conception, il ressort une forte disparité quant à l'intégration du facteur humain au sein du département de maintenabilité. En effet, la proportion de non-intégration de l'ergonomie domine dans la majorité des étapes, avec des pourcentages oscillant entre 43% et 93%, excepté dans l'étape touchant la validation où tous les acteurs-métiers intègrent le facteur humain comme expliqué précédemment. De manière plus générale, l'intégration du facteur humain se révèle significativement différente entre chaque étape du processus de conception confirmant ainsi la disparité de cette intégration, quelle que soit la manière de faire.

Cette intégration du facteur humain qui varie pour chacune des étapes du processus de conception en maintenabilité, peut s'expliquer par l'absence d'une méthodologie claire et formalisée aussi bien au sein de notre entreprise pilote que dans d'autres entreprises comme le confirme la littérature, si nous nous appuyons sur les derniers travaux. Nos résultats ont en effet montré que sur l'ensemble des étapes qui compose le processus de conception, la prise en compte du facteur humain est assez aléatoire, voire de temps en temps totalement absente, confirmant ainsi les travaux de Garrigou et al., 2001, qui conclut que l'ergonomie reste la « remorque » de la technique. Ce constat est finalement assez ancien et plusieurs auteurs ont développé dès les années 1990 des méthodologies d'intervention dans les processus de conception pour tenter d'équilibrer composantes techniques et ergonomiques (Daniellou, 1987 ; Bellemare et coll., 1995 ; Daniellou et Naël, 1995). En maintenabilité, la plupart des études récentes ont présenté soit des méthodes pour mieux intégrer le facteur humain autour de certains indicateurs relevant surtout de la composante physique de l'ergonomie (Moreu De Leon et al., 2012 ; Van Horenbeek et al., 2013), soit des outils de simulation numériques et des maquettes physiques permettant également de mieux prendre en compte le facteur humain autour de ces mêmes indicateurs mais sans réellement tenir compte des étapes du processus de conception (Geng et al., 2013; Gironimo et al., 2004; Amundarain et al., 2002; Das & Sengupta, 1996). Les outils de simulation semblent pouvoir dès lors être une voie pour réaliser des analyses de maintenabilité permettant l'étude du facteur humain mais ne semblent pas encore être suffisamment déployés et exploités afin d'assurer une réelle intégration du facteur humain sur l'ensemble du processus de conception. Au-delà de l'étude du facteur humain avec les outils de simulation, nos résultats ont montré que la collaboration multi-métiers fait partie des façons de faire pour intégrer le facteur humain. La dimension collaborative des outils de simulation a déjà été très étudiée (Mahdjoub et al., 2010). En particulier, les outils de simulation qui permettent en effet de réaliser des supports, des représentations intermédiaires ou Objet Intermédiaire de Conception (OIC) : plans, maquettes numériques 3D, permettant à chaque acteur-métier du bureau d'études de mieux se comprendre et d'interagir entre eux (Vinck, 2009). Cette dimension collaborative est d'autant plus importante qu'il faut la voir comme facteur d'innovation autour d'une meilleure prise en compte du facteur humain. Ainsi, l'usage des outils de simulation dans le département de maintenabilité de notre industriel ne semble pas aujourd'hui favoriser suffisamment l'intégration du facteur humain, pour les raisons évoquées, à savoir l'absence de connaissances et de méthodes pour mettre en place une réelle démarche de conception centrée sur le facteur humain.

Ainsi, ces différentes analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse H2 : « l'absence de méthodes prédéfinies et formalisées pour intégrer le facteur humain en maintenabilité explique une approche surtout techno-centrée en maintenabilité ».

4.3. Synthèse de la discussion

L'observation de l'état des lieux au sein même du département de maintenabilité de notre industriel portant sur le degré de compétence et d'intégration du facteur humain dans le processus de conception a été réalisée à travers un questionnaire semi-directif, appuyé par une étude de documents techniques.

Le tableau 12 suivant synthétise l'ensemble des résultats obtenus.

Tableau 12 : Synthèse des résultats de l'observation industrielle.

Hypothèses	Entretiens semi-directifs	Analyses documents techniques
<p>H1 : « l'absence de connaissances en facteur humain ne permet pas aux acteurs-métiers en maintenabilité d'intégrer efficacement le facteur humain dans les projets qu'ils conduisent »</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pas d'experts en facteur humain au sein du département pilote de la maintenabilité, ➤ Prise en compte du facteur humain par expérience sans s'appuyer sur des connaissances provenant de formations spécifiques, ➤ Analyses de facteur humain réduites à une très faible quantité d'indicateurs et de surcroît issues de l'ergonomie physique, ➤ Outils de simulation utilisés ponctuellement pour faire des approches ergonomiques, ➤ Analyses ergonomiques intuitives et subjectives. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seuls 4 indicateurs techniques sont retrouvés, dont un seul systématiquement étudié : l'accessibilité, ➤ Outils de simulation utilisés pour supporter l'analyse de ses indicateurs.
<p>H2 : « l'absence de méthodes prédéfinies et formalisées pour intégrer le facteur humain en maintenabilité explique une approche surtout techno-centrée en maintenabilité »</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Intégration aléatoire du facteur humain sur l'ensemble des étapes du processus de conception, ➤ Les étapes de la revue de pré-développement et de validation sont les seules étapes où l'on observe une réelle volonté d'intégrer le facteur humain dans les analyses de maintenabilité, sans approche rigoureuse, mais confirmant l'importance de ces étapes dans le processus de conception. ➤ Les outils de simulation peuvent être mieux exploités pour mieux collaborer avec les autres départements du bureau d'études et ainsi favoriser la prise en compte du facteur humain avec les exigences techniques. 	

5. Synthèse du chapitre et perspectives

Dans cette dernière partie, nous présentons la synthèse de ce chapitre ainsi que les perspectives permettant de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité.

5.1. Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre 1 et les différentes parties qui le composent nous avons pu observer, grâce à la conduite d'une étude exploratoire, dans un contexte de l'industrie aéronautique, que les acteurs-métiers en maintenabilité essayaient d'intégrer le facteur humain en se basant essentiellement sur la composante physique de l'ergonomie, et non cognitive, voire organisationnelle. Ce contexte en bureau d'études, composé de spécialistes en conception mécanique, a permis de comprendre pourquoi le compromis entre les exigences ergonomiques et les critères mécaniques n'était pas optimal. On soulève plusieurs causes possibles :

- Il n'y a pas d'experts en facteur humain au sein de la maintenabilité ;
- L'acteur-métier en maintenabilité a la volonté de prendre en compte le facteur humain mais n'a ni formation, ni connaissances dédiées ;
- L'acteur-métier prend en compte le facteur humain principalement en s'appuyant sur quelques normes et/ou standards ergonomiques ;
- Les analyses ergonomiques sont réduites à une faible quantité d'indicateurs relevant de l'ergonomie physique (anthropométrie, accessibilité, gestes et postures, efforts,...) ;
- Les analyses ergonomiques sont conduites sans réelle rigueur, s'appuyant sur aucune méthodologie clairement définie et validée ;
- Le facteur humain est intégré de manière hétérogène sur l'ensemble du processus de conception, sans aucune méthodologie prédéfinie ;
- Les outils de simulation déjà utilisés dans le département pourraient servir à mieux collaborer avec les autres départements du bureau d'études et ainsi favoriser le compromis entre critères techniques et exigences ergonomiques.

Ces différentes analyses permettent de valider nos deux hypothèses de recherche ainsi que notre première contribution.

5.2. Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité

Ce premier chapitre nous a permis d'observer que le facteur humain, notamment au travers de l'ergonomie, manquait lors des études de maintenabilité. Nous avons observé d'une part le manque de savoir et de savoir-faire en facteur humain des ingénieurs et des techniciens ; d'autre part le manque d'objectivité dans les études ergonomiques conduites, contribue souvent à la prise de décisions autour des contraintes techniques plus que des exigences de facteur humain. Or, la maintenabilité est une discipline où la condition de l'opérateur de maintenance doit être le « leit motiv » imposant donc à l'acteur-métier une prise en compte continue du facteur humain.

Ainsi, l'objectif de nos travaux de recherche est alors d'améliorer la prise en compte du facteur humain au sein même du bureau d'études maintenabilité et sur l'ensemble du processus de conception. En d'autres termes, au regard de la figure 18 (déjà évoquée dans ce chapitre), il conviendra **d'assurer des études du facteur humain objectives et systématiques de la part des acteurs-métiers en maintenabilité** (noté 2 sur la figure 18). Les résultats des études pourront également « peser » avec force face aux critères techniques des autres entités, éviter des actions solitaires et ponctuelles de la part des autres départements (noté 3 sur la figure 18). Egalement, les besoins spécifiés grâce au retour d'expériences (noté 1 sur la figure 18) pourront également être pérennisés jusqu'à la mise en distribution sur le marché du système étudié, dans notre cas, l'hélicoptère.

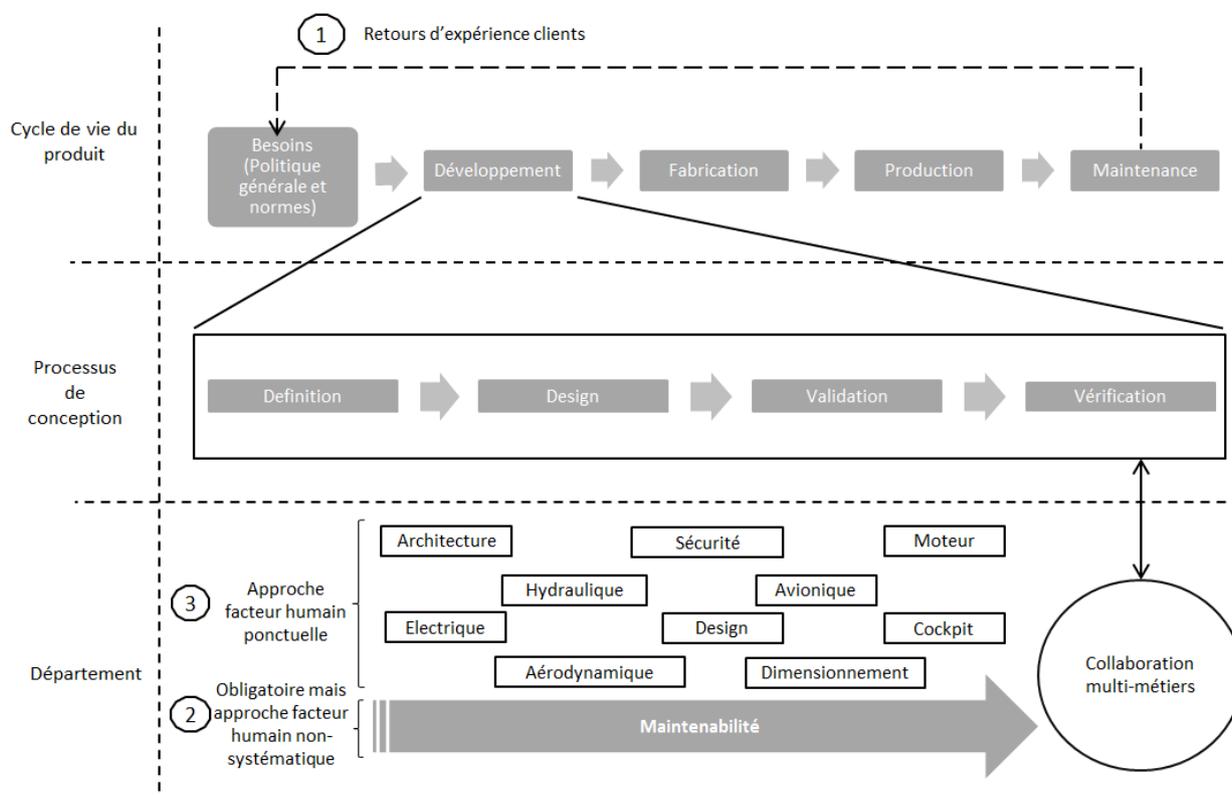


Figure 18 : Représentation des trois voies principales pour intégrer l'ergonomie dans le processus de conception en maintenabilité.

Pour tenir cet objectif, nous proposons dans la suite de ces travaux de thèse, de mieux comprendre l'usage et l'efficacité des outils de simulation (le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique) pour mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité. Ces outils sont en effet déjà utilisés au sein du bureau d'études et peuvent permettre de dégager des représentations intermédiaires ou Objets Intermédiaires de Conception (OIC) permettant ainsi à chaque acteur-métier du bureau d'études de mieux se comprendre, de mieux collaborer et de mieux interagir entre eux en accord avec les travaux de Vinck (2009). Ces OIC peuvent en effet, comme nous avons pu le montrer au sein de notre équipe de recherche, de mieux soutenir les interactions sociales et de communication lors des revues de projets par exemple (Mahdjoub et al., 2010). Ces outils ont également déjà montré leur capacité à fournir des données objectives lors d'études ergonomiques (Hashim et al., 2014 ; Nishanth et al., 2015 ; Lorisson, 2010 ; Seth et al, 2011 ; Das & Sengupta, 1996).

Aussi, l'activité de maintenance simulée avec les outils de simulation doit être représentative lors des phases de conception. Il s'agit alors de bien comprendre les contraintes (physiques, cognitives et organisationnelles, définies par l'IEA, 2000) impactant l'opérateur de maintenance et d'étudier son activité au travers de l'ensemble des outils de simulation. Nous pourrions ainsi connaître les avantages mais aussi les limites de chacun des outils de simulation dans un contexte de maintenance. Cette approche devra nous permettre de proposer une démarche qui pourra être utilisée par chaque acteur-métier de la maintenabilité afin d'analyser objectivement certains indicateurs ergonomiques à travers l'usage des outils de simulation. Nous proposons de détailler ces actions dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE II. LES OUTILS DE SIMULATION POUR MIEUX INTEGRER LE FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE

Ce chapitre a fait l'objet **d'une communication dans le cadre d'une conférence internationale** :

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2018, August). Virtual Reality Simulation and Ergonomics Assessment in Aviation Maintainability. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 141-154). Springer, Cham. doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15;

et **d'un article dans une revue internationale à comité de lecture et référencée dans les bases de données internationales** :

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2019). Using Digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability. Human factors. doi.org/10.1177/0018720819861496.

Chapitre 2 : Les outils de simulation pour mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité

1. Introduction	94
2. Etat de l'art	94
2.1. Généralité sur la simulation	94
2.2. Les outils de simulation en maintenabilité	97
2.2.1. Modeleur et mannequin numérique	98
2.2.2. Réalité virtuelle	100
2.2.3. La maquette physique	106
2.3. Synthèse de l'état de l'art	108
3. Seconde expérimentation	110
3.1. Contributions et hypothèses de recherche associées	110
3.2. Méthodes et techniques	111
3.2.1. Zone d'étude	111
3.2.2. Tâches sélectionnées	112
3.2.3. Dispositifs des outils de simulation	113
3.2.4. Participants et organisation de l'expérimentation	116
3.2.5. Indicateurs ergonomiques et outils associés analysés	118
3.3. Présentation des résultats	120
4. Discussion	125
5. Synthèse de la discussion	131
6. Synthèse et perspectives	132
6.1. Synthèse du chapitre	132
6.2. Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité	133

1. Introduction

Le chapitre précédent nous a permis d'observer le degré de connaissance générale en facteur humain dans un bureau d'études de maintenabilité dans une entreprise aéronautique, de la même façon, nous avons pu voir dans quelles étapes du processus de conception en maintenabilité, le facteur humain est le mieux pris en compte et à partir de quelles méthodes et/ou outils. Ces observations nous ont permis de mettre en évidence que le manque de connaissance en facteur humain, et en particulier en ergonomie de la part des acteurs-métiers en bureau d'études, ce qu'ils reconnaissent sans aucune difficulté, ne leur permettent pas d'envisager une réelle articulation croisant exigences mécaniques et exigences ergonomiques. En effet, leurs analyses ergonomiques se focalisent principalement autour de la composante physique de l'ergonomie ne leur permettant pas d'avoir ainsi une réelle compréhension de la situation de travail étudiée, au sens « activité de travail ». Or, en accord avec l'IEA déjà citée (2000), il convient dans toutes analyses ergonomiques d'intégrer deux autres composantes que sont l'ergonomie cognitive et organisationnelle. Egalement, notre constat s'est aussi porté sur les outils actuellement disponibles en bureau d'études qui peuvent être communs entre les concepteurs et les ergonomes. Ces outils, qu'ils soient numériques ou physiques, portent sur leur capacité à simuler une activité humaine, et donc dans notre cas une activité de maintenance. Il est apparu, à travers la littérature et notre observation sur notre site pilote, que ces outils sont sous-exploités de la part des concepteurs en maintenabilité pour réaliser des approches du facteur humain, voire des analyses ergonomiques.

Ce chapitre a donc pour objectif, dans une première partie, de mieux définir la notion de simulation en ergonomie et des outils associés. Nous essaierons de comprendre leurs limites et leurs avantages à travers les travaux de la littérature. Nous présenterons dans un deuxième temps une observation de terrain permettant de mieux comprendre l'intérêt de ces outils de simulation pour étudier le facteur humain dans le département de la maintenabilité de notre service pilote. Ainsi, en observant ce qu'apporte chacun des outils de simulation dans l'analyse du facteur humain, nous pourrions peut être ainsi mieux comprendre comment un acteur-métier en maintenabilité peut pleinement utiliser ces outils de simulation, digitaux ou physiques, afin d'étudier l'ergonomie des futures situations de travail de maintenance à des fins de sécurité, de sauvegarde de la santé des opérateurs de maintenance et d'efficacité de travail. Nous développerons ce dernier objectif dans le chapitre 3.

2. Etat de l'art

2.1. Généralité sur la simulation

Il convient, dans un premier temps, d'aborder la notion de simulation et plus particulièrement la simulation en ergonomie, discipline à travers laquelle, comme déjà évoqué, nous allons étudier, analyser, une meilleure prise en compte du facteur humain en maintenabilité.

La notion de simulation en ergonomie a été abordée à plusieurs reprises dans la littérature, faisant souvent suite à des besoins relevant de cas pratiques dans l'industrie aéronautique (Theureau, 1997), nucléaire (Theureau, 1997) ou encore automobile (Lebahar, 1998). La simulation en ergonomie a un double enjeu : anticiper l'activité future en phase de conception et former/éduquer l'opérateur à un nouveau poste de travail. Dans les deux cas, « *la simulation, c'est au fond la tentative de renverser ou d'inverser le cours du temps pour en pallier les principaux effets et tenter de s'en rendre maître* » (Dubey, 1997). En d'autres termes, la simulation doit apporter la connaissance suffisante au concepteur et/ou à l'opérateur pour qu'ils s'approprient le futur environnement afin d'en discerner toutes les subtilités de l'interaction potentielle entre l'Homme, le système, le poste, l'outil,... et l'environnement. Le concepteur aura alors la possibilité de « designer », modifier son architecture afin de l'adapter aux caractéristiques et attentes des personnes. Quant à l'opérateur, il pourra connaître les stratégies à adopter, les connaissances essentielles à mémoriser et entraîner ses réflexes pour conduire au mieux son activité, dans la sécurité et la préservation de sa santé. Au-delà de la formation, la simulation permet aussi d'anticiper les « erreurs humaines » notamment dans le secteur du nucléaire (Zou et al., 2017) ou encore de l'aéronautique (Strauch, 2017). En effet, ces auteurs proposent d'utiliser des outils de simulation numériques telle que la réalité virtuelle pour étudier, comprendre et anticiper les comportements des opérateurs. En mettant en œuvre de nombreuses simulations mettant à l'épreuve les opérateurs dans différentes conditions, il devient possible d'observer des erreurs récurrentes qui pourront être corrigées par l'amélioration des systèmes, voire de l'environnement physique, ou encore par une meilleure formation des opérateurs.

Nos travaux de recherche se focalisant sur l'activité d'un bureau d'études, nous poursuivons notre analyse pour le premier cas, celui du concepteur qui doit anticiper et comprendre l'activité future de ce qu'il est en train d'imaginer, de concevoir et de développer.

La simulation en ergonomie se distingue par trois objectifs qui ont été définis par Béguin et Weill-Fassina (1997) et que nous détaillons ici dans le cadre d'analyses menées en bureau d'études :

- **Connaître** une situation de travail dont l'observation réelle est impossible ;
- **Agir** au plus tôt dans le processus de conception afin que des modifications soient apportées. Nous pouvons faire le lien avec la définition de la maintenabilité dans le chapitre I qui vise à impacter l'architecture, les outillages de maintenance et les futurs processus/consignes de maintenance qui seront adressées aux opérateurs ;
- **Interagir** autour de la notion sociale, c'est-à-dire que chaque acteur-métier du bureau d'études travaillant sur un système doit connaître et comprendre les situations simulées et leurs conclusions à des fins d'homogénéité de la donnée technique finale.

Ces trois objectifs s'inscrivent dans une démarche plus globale dont la simulation en est le pivot. La figure 19 suivante présente la formalisation de la démarche de conduite de projet de simulation en ergonomie (Hauret et al., 2016). Avant toute simulation, il faut d'abord **analyser** le contexte actuel et bien-sûr le futur contexte dans le lequel le produit ou système en développement sera utilisé. Il convient alors, pour préparer la simulation, de réaliser une étude par analogie à des

systèmes similaires, voire existants. Il existe souvent des contextes de travail, d'usage qui sont proches de la situation voulant être simulée. Les hélicoptères ont, pour la plupart, la même structure avec des tâches de maintenance pouvant être similaires. Il est donc nécessaire de réaliser une analyse prospective des tâches de maintenance existantes pour entrevoir d'éventuelles similitudes avec la future tâche de maintenance sur un nouvel hélicoptère. Cette préparation a aussi pour but d'assurer une forte validité écologique de la future simulation. C'est-à-dire assurer l'écart le plus faible entre ce qui est simulé et ce qui se passera en situation réelle. Dans un deuxième temps, il faut **concevoir autour de la simulation**. C'est le principe de la conception anthropo-centrée telle que définie en particulier par Sagot (1999). C'est dans ce cadre que s'insère les trois objectifs « connaître, agir et interagir ». Ainsi, dans cette phase, il convient de simuler la future tâche de maintenance en tenant compte des caractéristiques du futur opérateur de maintenance. La dernière étape, **formaliser**, est quant à elle peut être l'une des plus importante en bureau d'études. Au regard des résultats issus de notre chapitre I, mettant en évidence le manque de connaissance en ergonomie de la part des acteurs-métiers en bureau d'études et plus particulièrement en maintenabilité, cette étape de formalisation vise avant tout à communiquer avec l'ensemble des départements du bureau d'études travaillant sur le système étudié et simulé. Une bonne formalisation de la simulation et des conclusions associées entraînent des recommandations ergonomiques qui devront être challengées face aux critères mécaniques.

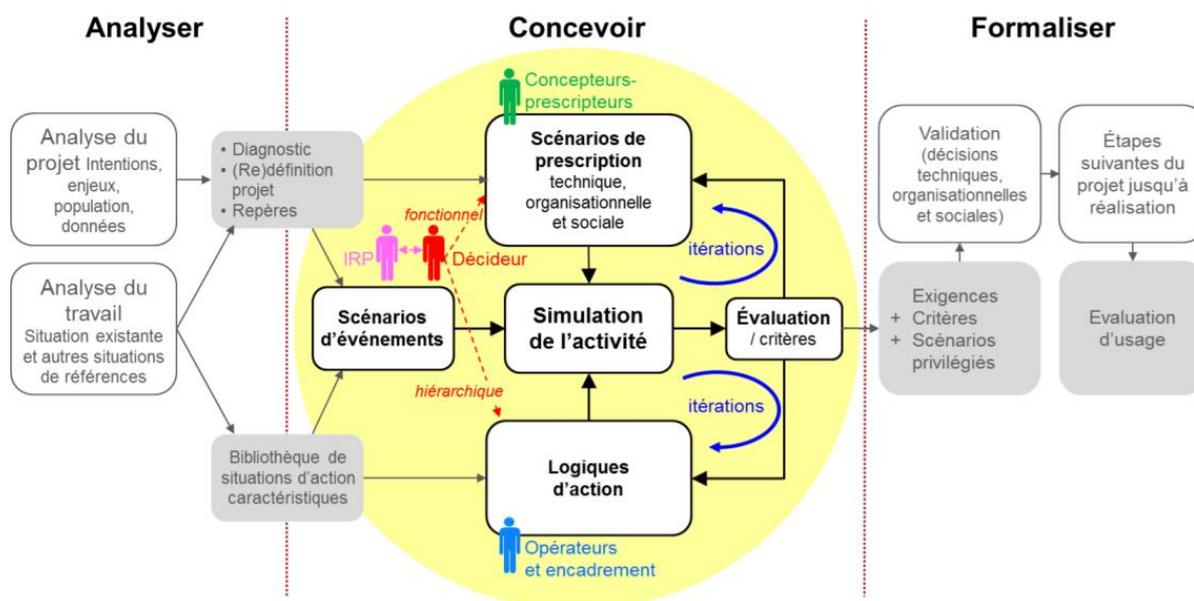


Figure 19 : La démarche de conduite de projet en ergonomie selon Van Belleghem & Guerry (2016, adapté de Van Belleghem, 2012 et Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013).

Nous allons maintenant analyser les outils de simulation existants et utilisés en bureau d'études pour réaliser des analyses ergonomiques.

2.2. Les outils de simulation en maintenabilité

Aujourd'hui, en maintenabilité et donc dans un contexte de conception préliminaire de tâches de maintenance, l'intégration du facteur humain à travers l'ergonomie consiste souvent à transférer certaines exigences, aux ingénieurs, liées aux caractéristiques, aux attentes et aux besoins des opérateurs via des systèmes experts en ergonomie (Broberg, 2007 ; Kaljun & Dolšak, 2012). Ces systèmes experts mettent souvent en œuvre des outils de simulation numériques car ce sont souvent les premiers moyens d'évaluation et de validation de la conception de produit (Shephard et al., 2004). En effet, dans la majorité des bureaux d'étude, les ingénieurs et les techniciens conçoivent des produits/systèmes en se fiant davantage à leur propre intuition et expérience (Broberg et al., 2007). Les outils classiques de simulation numériques tels que les modeleurs numériques, qui peuvent, dans une certaine mesure, les aider à conduire des analyses et des évaluations ergonomiques liées à l'espace physique de l'environnement sont ainsi majoritairement utilisés, exploités (Kaljun & Dolšak, 2012). En effet, les acteurs-métiers du bureau d'études vont prendre des dimensions ou regarder les collisions potentielles entre les pièces et les outillages pour se rendre compte de la faisabilité d'une tâche mais bien en termes d'espace de travail, souvent basé sur des aspects très normatifs. Par exemple, pour dimensionner une trappe d'accès pour la main, l'acteur-métier va s'appuyer sur une norme (figure 20) sans se préoccuper de l'activité de maintenance qui sera réalisée réellement par un opérateur à l'intérieur de la trappe (AFNOR, 2008).

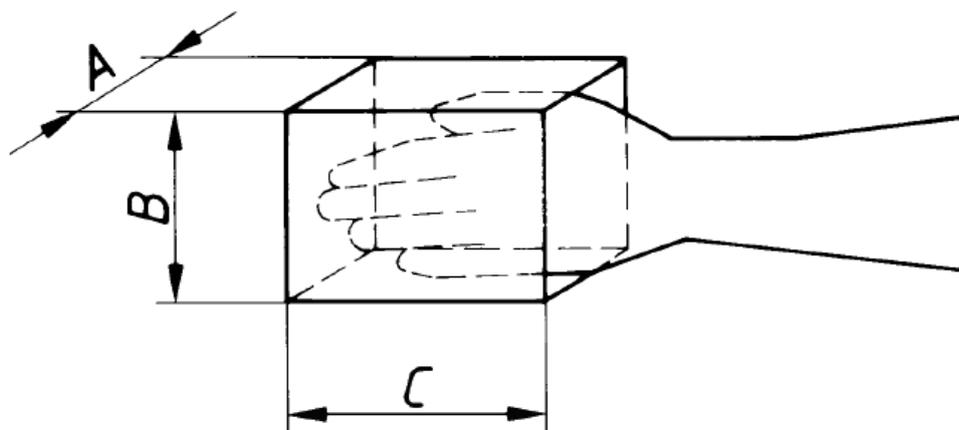


Figure 20 : Dimensionnement d'une trappe d'accès pour la main selon la norme NF EN ISO 14738 Novembre 2008 (X35-104 Sécurité des machines - Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines).

Les mannequins numériques sont également des outils de simulation très utilisés qui permettent l'intégration de l'ergonomie dans les phases amont du processus de conception dans plusieurs domaines industriels tels que la maintenance ou encore la fabrication (Perez et al., 2004 ; Krüger & Nguyen, 2015 ; Zhou et al., 2016). Les technologies de réalité virtuelle sont aussi de plus en plus utilisées car elles permettent d'aller plus loin dans les phases de prises de décisions multidisciplinaires pour analyser et évaluer l'ergonomie des produits mais aussi des activités d'usages associées. L'interaction qu'elle procure entre l'opérateur et l'environnement immersif permet de simuler des tâches réalistes comme celles de la maintenance dans le secteur aéronautique (Seth et al., 2011 ; Garza et al., 2013). Par exemple, la figure 21 présente un ingénieur

immergé dans un environnement virtuel. Il peut ici interagir avec le modèle 3D d'un moteur d'avion afin de s'assurer que toutes les pièces seront accessibles pour l'opérateur de maintenance.



Figure 21 : Ingénieur immergé dans un environnement 3D afin d'étudier l'accessibilité des pièces d'un moteur d'avion afin d'assurer la maintenance future.

Avec ces outils relevant du numérique, les analyses ergonomiques en maintenabilité se focalisent principalement sur la dimension physique de l'ergonomie : l'anthropométrie, les postures et les gestes, les efforts..., ne prenant ainsi que très peu, pour ne pas dire pas, en compte l'activité réelle de travail des opérateurs de maintenance, ni l'organisation de travail établie. L'étude conduite dans le chapitre précédent a pu ainsi montrer que les acteurs-métiers en maintenabilité, à cause de leur non expertise en ergonomie, étudient principalement les aspects physiques malgré une prise de conscience, voire une volonté, pour certains, d'étudier les aspects cognitifs et organisationnels sans pour autant atteindre les objectifs réellement souhaités ainsi que nous avons pu le montrer (Bernard et al., 2017 ; 2019).

2.2.1. Modeleur et mannequin numérique

Il convient maintenant de recenser les outils qu'utilisent les acteurs-métiers en maintenabilité pour intégrer le facteur humain dans leurs tâches de tous les jours. Afin de concevoir et d'évaluer les nouveaux concepts, de nombreux outils existent pour suivre et valider le projet d'un point de vue ergonomique. Parmi ces outils, le numérique a largement pris le pas pour expertiser, évaluer et prendre des décisions lors des phases préliminaires de conception. Nous pouvons citer notamment les simulations par mannequins numériques paramétrables qui permettent l'intégration du facteur humain dans les phases amont du processus de conception, qu'il s'agisse du produit, mais également de sa fabrication ou de sa maintenance (Perez & al 2014 ; Kruger – Nguyen 2015). Nous pouvons aussi citer les travaux de Rasmussen (2002, 2008) sur le mannequin numérique ANYBODY qui ont pour objectif de coupler certains critères géométriques d'un futur produit et des exigences ergonomiques dans une démarche d'optimisation multidisciplinaire. Ce même mannequin est aussi très utilisé dans le domaine biomédical puisqu'il modélise dynamiquement le mécanisme interne du

corps (triptyque squelette, tendon, muscle) (Kang et al., 2018). La figure 22 montre le comportement du genou lors d'un exercice sportif (musclation) soumis un système de soutien intégré directement à la rotule. ANYBODY simule alors le nouveau comportement du genou pour s'assurer que le futur dispositif médical jouera un rôle thérapeutique et diminuera la pathologie diagnostiquée.

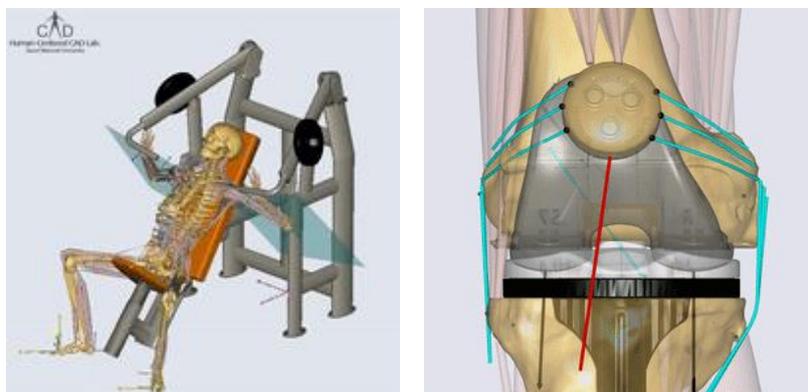


Figure 22 : Représentation du mannequin Anybody lors d'un exercice physique, associé au comportement du genou qui intègre un dispositif médical (Kang et al., 2018).

D'autres mannequins numériques existent comme JACK (Badler et al., 1993) qui a été développé par la NASA (National Air Space Administration). Ce mannequin a été conçu pour anticiper l'assemblage de la station spatiale internationale, plus particulièrement pour optimiser les enveloppements d'atteinte entre les pièces en fonction de l'anthropométrie des mannequins mais également des vêtements souvent volumineux limitant la capacité motrice entre les articulations (Chaffin, 2008). RAMSIS (Van der Meulen & Seidl, 2007) est un mannequin numérique qui est développé dans le contexte automobile pour anticiper en phase de conception la forme des sièges en faisant varier les dimensions anthropométriques des mannequins. Globalement, de nombreux mannequins ont été créés, nous nous sommes proposés d'en faire une synthèse avec les références associées dans le tableau 13.

Tableau 13 : Exemple de mannequins développés pour analyser des situations de travail dans divers domaines, signalé par le sigle « X », tels que l'aviation, l'automobile et autre, incluant le médical, les postes de travail...

Mannequins	Aviation	Automobile	Autres domaines (médical, etc)	Références
3DSSPP			X	Asadi et al., 2015
AnyBody			X	Kang et al., 2018
Daz Studio			X	Poirson & Delangle, 2013
Human Builder	X	X	X	Shi, Yongsheng et Yu Liu., 2012
HumanCad		X	X	Poirson & Delangle, 2013
Jack	X			Di Gironimo, G. et al, 2004
MakeHuman			X	Poirson & Delangle, 2013
Poser			X	Poirson & Delangle, 2013
Quidam			X	Poirson & Delangle, 2013
RAMSIS		X		Van der Meulen & Seidl, 2007
Sammie		X	X	Poirson & Delangle, 2013
Santos		X		Abdel-Malek et al., 2007

Les mannequins utilisés dans les domaines aéronautique et automobile permettent d'évaluer l'activité au travail suivant des indicateurs ergonomiques physiques récurrents tels que l'anthropométrie à travers les données fondamentales que sont la taille des personnes, les postures, le champ visuel ou encore les analyses ergonomiques comme RULA pour évaluer le risque de TMS ou l'équation du NIOSH pour évaluer la contrainte dorso-lombaire lors d'un lever de charge (Chaffin, 2008 ; Satheeshkumar & Krishnakumar, 2014). Afin d'illustrer notre propos, nous présentons quelques exemples d'utilisation de mannequins numériques à des fins de prise en compte du facteur humain, issus du domaine automobile, précurseur dans le domaine qui nous intéresse, et du domaine qui fait l'objet de notre étude, l'aéronautique. Le domaine automobile prend très « au sérieux » la maintenance et la facilité à réaliser les actions associées. Les nouvelles méthodes numériques permettent d'anticiper de plus en plus tôt le design de chaque pièce, voire d'un ensemble de pièces. Certaines études se concentrent sur les indicateurs permettant d'évaluer chaque pièce ou système dans les tâches de maintenance. Trois critères sont aujourd'hui quantifiés et évalués pour confirmer la faisabilité de la maintenance de pièces composant un système mécanique : désassemblage, accessibilité, utilisabilité (Di Gironimo, G. et al, 2004). Nous pouvons d'ailleurs préciser que l'étude de Di Gironimo et al, 2004, a utilisé le mannequin numérique Jack (EAI-UGS) pour toutes ses évaluations ergonomiques. L'industrie aéronautique essaie également d'utiliser en premier lieu les outils de conception assistés par ordinateur pour intégrer l'ergonomie dans le processus de conception d'aéronefs. Nous retrouvons d'ailleurs des outils similaires avec les mannequins numériques. Human Builder de CATIA, par exemple, a fait l'objet d'études pour vérifier des tâches de maintenance, notamment avec l'évaluation de postures, d'efforts ou encore des champs visuels (Shi, Yongsheng et Yu Liu., 2012) mais également l'agencement des postes de pilotage (Ahmed et al., 2018).

Cependant, il est difficile de prendre des décisions et de valider des études ergonomiques sur ces seuls outils qui n'évaluent que la dimension physique de la situation de travail, du produit étudié et beaucoup moins la dimension fondamentale liée à l'opérateur lui-même à travers, son raisonnement, son savoir, son savoir-faire, sa charge mentale... (ergonomie cognitive) ou liée à l'organisation du travail en place, travail en équipe,... (ergonomie organisationnelle). De plus, ces outils ne permettent pas d'anticiper l'activité des opérateurs lors d'une séquence de travail. En effet, le mannequin est positionné par l'acteur-métier dans son environnement numérique à des fins, souvent, d'apprécier des collisions possibles, mais l'acteur-métier n'anticipe pas l'activité réelle des opérateurs de maintenance, car il ne la connaît pas.

2.2.2. Réalité virtuelle

Il convient de noter, ce que confirme la littérature, que les logiciels de simulation numérique tels que CATIA et DELMIA, précédemment évoqués, ne remplacent pas réellement les plus-values apportées par les technologies de réalité virtuelle (RV) (Gynn & Steele, 2015). La RV est définie comme « un environnement artificiel qui est expérimenté à travers des stimuli sensoriels (comme des images et des sons) fournis par un ordinateur et dans lesquels ses actions déterminent en partie ce qui se passe dans l'environnement » (Merriam-Webster, 2018). Egalement, on peut définir la RV comme étant un environnement numérique généré par ordinateur qui peut être expérimenté et

interconnecté comme si cet environnement était réel (Jerald, 2015). C'est pourquoi les outils de RV sont vus comme une solution efficace quant à l'évaluation et à la prise de décision autour d'exigences venant de plusieurs métiers, notamment de la mécanique mais aussi de l'ergonomie (Lorisson, 2006 ; Craig, Sherman, & Will, 2009; Lorisson, 2010) puisqu'ils permettent une immersion et une interaction dans ce qui est développé numériquement par des acteurs-métiers en bureau d'études. La RV a démontré tout son intérêt pour améliorer les phases de prise de décisions multidisciplinaires, la compréhension de simulations numériques complexes (Gherbi et al., 2006). Elle est aussi très présente pour simuler et valider des tâches d'assemblage/désassemblage, de maintenance dans différents domaines comme celui de l'aéronautique (Garza et al., 2013; Seth et al., 2011), et est également très utilisée comme outil d'analyse et d'évaluation ergonomique de produits et activités associées (Craig et al., 2003; Lorisson, 2006). C'est un outil qui est mis en œuvre pour mieux définir la prise en compte de l'activité future souhaitable des opérateurs en termes de sécurité, de santé et d'efficacité (Sagot et al., 2003 ; Chitescu et al., 2003), à travers des analyses qualitatives auprès des experts métiers mais aussi des futurs opérateurs. Aujourd'hui, de nombreux travaux proposent de compléter ces résultats par des analyses dites plus « objectives ». Ces analyses peuvent par exemple s'appuyer sur des données quantifiables en évaluant l'activité future de l'opérateur, qui sera mise en œuvre sur les postes de production par exemple. Ainsi, les travaux de Jayaram (2006) proposent d'évaluer des tâches d'assemblage réalisées par un opérateur réel en environnement virtuel à l'aide d'une méthode d'évaluation des gestes et postures qui donne un score calculé à partir de données quantifiées en fonction de la position des segments corporels de l'opérateur réel. Ainsi, par exemple, dans un objectif de prévention des TMS (Troubles Musculo-Squelettiques), l'équation du NIOSH (Waters, Putz-Anderson, Garg, & Fine, 1993) et le RULA (Rapid Upper Limb Assessment) (McAtamney & Corlett, 1993) ont été mises en œuvre en réalité virtuelle respectivement dans les études de Chryssolouris et al., 2000 et de Shaikh et al. en 2003. La première permet d'évaluer les contraintes dorso-lombaires liées à des ports de charge, le second, le RULA a pour vocation d'étudier les gestes et postures des différents membres corporels afin de donner un score de risque de troubles musculo-squelettiques. Les plates-formes de réalité virtuelle peuvent ainsi être une excellente opportunité d'évaluation et de prise de décisions avant le développement d'un produit, d'un système encore à l'état de maquette numérique et pas encore à l'état de maquette physique, connues pour être beaucoup plus onéreuses (De Sa & Zachmann, 1999).

Le secteur automobile a aussi intégré depuis les années 1990 les opérateurs dans le processus de conception et de validation des systèmes en vue d'améliorer la maintenance. La formation des opérateurs pour certaines phases de maintenance se fait également sur plate-forme de réalité virtuelle afin de s'assurer de la bonne manipulation des produits/systèmes développés, on parle ainsi de l'apprentissage des gestes et des postures. Le montage et le démontage des moteurs ont notamment été étudiés dans ce but précis de l'apprentissage (Wu & Fei, 2011). Ces mêmes plates-formes de RV servent également à la prise de décisions multi-métiers puisque tous les acteurs-métiers concernés par une étude peuvent tous travailler et échanger tout en visualisant le système étudié (Lorisson, 2006, pour une revue de question sur l'utilisation de la RV chez PSA Peugeot-Citroën). Le monde de la recherche essaie également d'améliorer la coordination des transferts de données entre la CAO et la réalité virtuelle, l'information ne devant pas se perdre (Sen et al., 2018). Le problème principal posé par De Sa & Zachmann, 1999, est l'itération entre les phases numériques et physiques qui sont souvent longues et répétitives. Les nouvelles méthodes permettent désormais

de passer du modèle numérique à une plate-forme de réalité virtuelle sans perte de données, mais l'inverse reste encore complexe à mettre en œuvre et passe souvent par la rédaction de rapports de modifications à transmettre au spécialiste CAO (Bourdot et al., 2010 ; Al Khatib et al., 2011).

L'industrie aéronautique essaie également depuis longtemps d'utiliser les technologies de la réalité virtuelle pour évaluer l'ergonomie des interfaces Homme-Machine (IHM). Avant même de parler de réalité virtuelle, la notion de simulation de l'activité est apparue dans les années 1940. Entre 1930 et 1940, les ingénieurs ont commencé à comprendre que la technologie n'était pas la seule cause des accidents aériens qui devenaient de plus en plus nombreux. L'augmentation du trafic aérien et la nécessité de former de plus en plus vite de jeunes pilotes leur ont fait comprendre que la formation serait l'une des clés pour assurer des vols en toute sécurité. La simulation a alors été utilisée pour simuler des séquences de vol dans des simulateurs statiques ou dynamiques à la fin de la Seconde Guerre Mondiale (Smith, 1976). Ainsi, des simulateurs ont vu le jour pour apprendre aux pilotes la relation existante entre les instruments de bord et leur impact sur le comportement de l'appareil et inversement (Horeman et al, 2015). Le simulateur présenté sur la figure 23 qui suit est l'un des seuls encore existant, il a été le premier officiellement conçu et déployé à grande échelle, appelé « Link Trainer », il est présenté ici au musée de la guerre de Christchurch en Nouvelle-Zélande (NewZealand Museum of War in Christchurch). Des vérins permettent des mouvements réalistes en fonction des actions appliquées sur les commandes. Cela avait aussi pour but d'entraîner les réflexes du pilote, la prise de repères dans l'espace pour mieux synchroniser les systèmes proprioceptifs, vestibulaires et visuels du pilote, surtout lors de vol sans référence visuelle extérieure (nuage, brouillard, fumée etc).

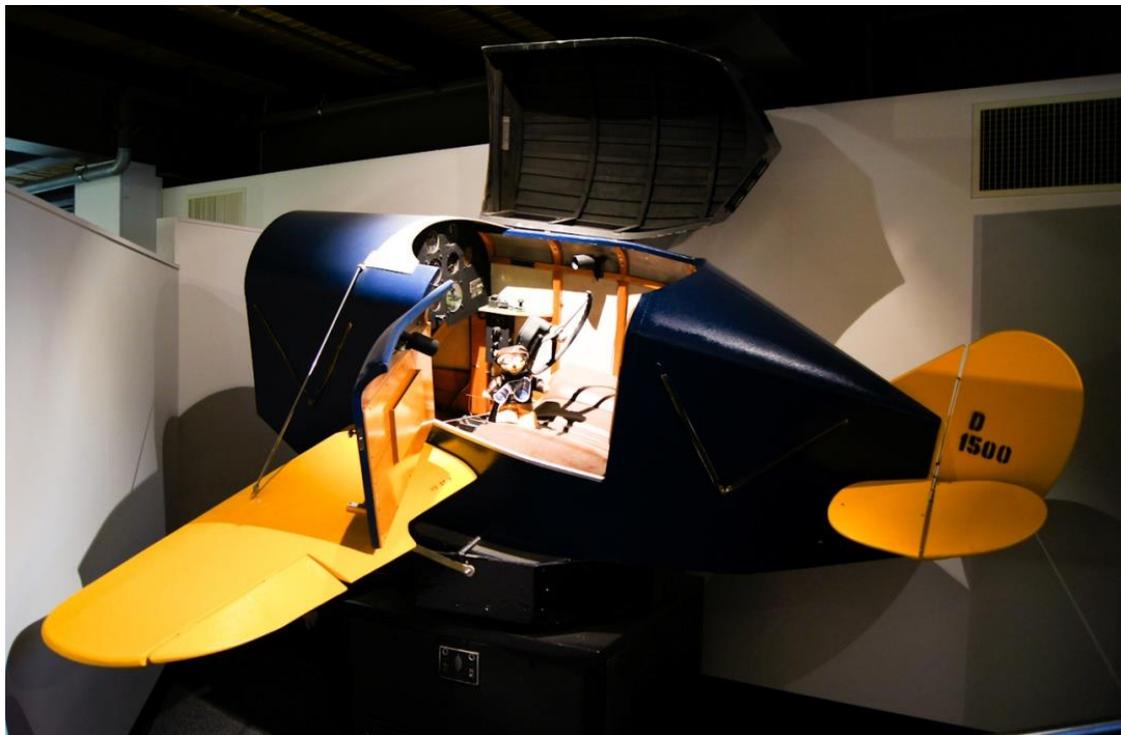


Figure 23 : Premier simulateur de vol, nommé "Link Flight Trainer" (New Zealand Museum of War in Christchurch, New Zealand) conçu à des fins de formations des futurs pilotes pendant la seconde guerre mondiale.

L'association de ces simulateurs à l'immersion est intervenue plus tard, en 1954, à la demande de la compagnie aérienne United Airlines. Du son a même été ajouté à l'intérieur du simulateur pour augmenter le réalisme des entraînements. La figure 24 présente ce type de simulateur, statique, construit par Curtiss-Wright Corporation.



Figure 24 : Simulateur statique intégrant les premiers effets d'immersion visuelle et sonore, construit par Curtiss-Wright Corporation.

La réalité virtuelle en bureau d'études, telle que nous la connaissons aujourd'hui, est apparue entre les années 1990 et 2000 mais n'a pas eu la croissance aussi rapide que pour la simulation des vols. En effet, l'utilisation de la réalité virtuelle étendue aux phases de conception soulève quelques interrogations quant à la réelle pertinence des résultats obtenus après simulation, notamment en maintenance. L'interaction qu'elle procure entre l'utilisateur et l'environnement immersif permet de simuler des tâches comme celles de la maintenance dans le secteur aéronautique (Garza et al, 2013 ; Seth et al, 2011). Les industriels se sont plus précisément attardés sur les zones sensibles qui nécessitent des actions régulières comme sur les moteurs. L'accessibilité étant peu aisée, les plateformes de réalité virtuelle ont permis de déterminer des tâches de maintenance complexes mais également les futures contraintes que pourrait subir un opérateur (Amundarain et al, 2003). L'étude de Amundarain et al., 2003, a par exemple montré l'importance de l'étude du champ visuel pour manipuler les pièces dans un environnement complexe, là encore sur la maintenance des moteurs. Or, cette étude s'est révélée efficace grâce à l'intégration de systèmes physiques synchronisés avec le monde virtuel.

En reprenant l'étude de Amundarain et al., 2003, la simulation en réalité virtuelle de la maintenance des moteurs a fait l'objet d'analyses reposant sur des retours physico-sensoriels. Le système haptique étudié s'est révélé performant sur l'ensemble du poste de travail que représente le moteur. En effet ce système suit l'opérateur dans son déplacement et a permis d'assurer le diagnostic de différentes postures. Ce système, dédié à un moteur spécifique, a donc permis d'étudier certains critères de la composante physique de l'ergonomie des tâches simulées. Les systèmes haptiques sont un réel enjeu de développement et doivent permettre d'aboutir à une évaluation optimale, puisqu'ils vont au-delà de l'immersion visuelle et sonore (Savall, J. et al 2002). Cependant le coût de développement et d'exploitation reste très important alors que de nombreuses situations de travail ne peuvent pas être étudiées. En effet, le dispositif reste très volumineux et complexe dans sa mise en œuvre, ne permettant pas une adaptabilité à toutes les

situations de travail. Dans le cadre de la maintenance aéronautique, un grand nombre de situations se réalisent dans un environnement très contraint dû à l'architecture même de l'aéronef. La figure 25 (gauche) montre l'exemple d'un bras haptique fixé sur un support fixe limitant les déplacements du corps. La figure 25 (droite), quant à elle, montre des gants haptiques. Ils permettent de simuler des efforts correspondant à la préhension de certains objets.



Figure 25 : Système de bras haptiques synchronisés (**gauche**) et système de gants haptiques simulant l'action de préhension d'objets (**droite**).

Les systèmes haptiques sont souvent utilisés seuls, ils atteignent ainsi une certaine limite dans leur capacité à simuler et à interpréter l'ensemble des contraintes que subira un utilisateur (Amundarain et al., 2003). Cette technologie n'apporte à l'utilisateur qu'une représentation physique partielle de l'objet n'offrant donc pas toujours une perception globale de ce que sera l'objet tant dans ses dimensions physiques mais aussi cognitives voire organisationnelles. Pour pallier à ces contraintes qui dans certains cas ne permettent pas la simulation, les systèmes dits tangibles existent. Comme le décrivent les travaux de Boy, 2018, la tangibilité se définit suivant deux axes :

- Physique, c'est-à-dire que l'élément virtuel peut être physiquement palpable, reproduisant ainsi toutes les contraintes en termes d'effort, de préhension ou encore de posture. L'objet physique est alors synchronisé avec celui représenté dans le monde virtuel ;
- Figuratif, c'est-à-dire que l'élément virtuel permet d'entrevoir, de comprendre voire de découvrir le ou les fonctions de l'objet manipulé. Cela induit un détail graphique élevé ainsi qu'un environnement riche afin de placer l'utilisateur dans un contexte d'usage.

Il apparaît alors évident que la tangibilité physique et la figurative sont indissociables dans la simulation virtuelle. En effet, l'interaction physique avec un objet ne peut être représentative tant dans son usage que dans sa fonction s'il n'est pas placé dans un contexte d'usage précis, dans notre cas le monde virtuel. A l'inverse, le figuratif ne peut se définir sans l'interaction physique. En effet, une simulation passant uniquement par l'immersion virtuelle ne fait finalement que placer un objet dans un contexte d'usage mais ne permet pas d'en comprendre toutes les contraintes physiques liées à son usage. Boy (2016) décrit les cinq propriétés pour assurer la tangibilité physique et la

tangibilité figurative : la complexité, la maturité, la flexibilité, la stabilité et la durabilité. La situation de travail est alors mieux représentée et mieux interprétée par l'opérateur. Cependant, la littérature ne se penche que très peu sur la possibilité d'évaluer les dimensions organisationnelles et cognitives de l'ergonomie dans ce nouveau contexte de simulation. En effet certaines études évoquent le besoin d'analyser ces deux dimensions (Burkhardt, 2003 ; Holt et al., 2004) voire la possibilité de les évaluer dans un contexte d'apprentissage pour interpréter et utiliser la documentation aéronautique (Ganier et al., 2013). Mais l'analyse ergonomique comprenant les trois dimensions (physiques, cognitives et organisationnelles) ne semblent pas encore généralisée.

Malgré tout, les systèmes tangibles sont de plus en plus utilisés et évoluent avec les nouvelles technologies. Ainsi, ils peuvent être représentés par un objet réel qui sera souvent maqueté en termes de volume, de masse ou de forme. L'émergence des technologies d'impression 3D (Boy, 2016) est alors un moyen efficace et rapide de construire des pièces tangibles à synchroniser avec le monde virtuel. Certaines industries, comme Ford dans le secteur automobile, ont développé des systèmes de tables modulaires en plus des pièces en impression 3D (Bhise, 2016). Cette table modulaire permet, dans le cas de cet industriel automobile, de recréer rapidement une architecture physique qui sera synchronisée avec l'architecture du monde virtuel. Par exemple, ici, une tâche de maintenance dans le moteur est simulée. La figure 26 présente une des pièces du moteur en impression 3D, et la figure 27 présente la table modulaire représentant ici les contours de la carrosserie sur lesquels l'opérateur viendra s'appuyer pour réaliser sa tâche.



Figure 26 : Pièce de moteur de voiture en impression 3D dédiée à une plateforme de réalité virtuelle par le constructeur automobile Ford sur le site Dearborn (2016).



Figure 27 : Table modulaire utilisée sur une plateforme de réalité virtuelle et synchronisée avec le monde virtuel par le constructeur automobile Ford sur le site Dearborn (2016).

Les outils de simulation numériques permettent donc de réaliser des approches ergonomiques, à condition qu'elles soient conduites par des personnes qui ont un minimum de connaissances dans la discipline (Bernard et al., 2018). Ces approches, il convient de le souligner, se font à des degrés de précision qui diffèrent en fonction du type d'outils utilisé (mannequin numérique ou réalité virtuelle) mais aussi du type de protocole, du type du plan d'expérience déployé. Ainsi, le mannequin numérique permet d'analyser des indicateurs ergonomiques dans sa dimension physique seulement alors que la réalité virtuelle peut permettre d'aller plus loin en évaluant une situation de travail, une activité de travail avec un opérateur réel. La composante physique de l'ergonomie est ainsi plus solidement analysée mais l'analyse des composantes cognitives et organisationnelles de l'ergonomie ne semble pas encore être intégrée, présente, faute de réelles connaissances sur le sujet de la part des acteurs-métiers en maintenabilité et plus largement en bureaux d'études.

2.2.3. La maquette physique

Contrairement aux outils numériques très largement exploités par les industriels, un autre outil de simulation existe, la maquette physique, qui est assez peu décrite dans la littérature comme outil de simulation pour anticiper les tâches de maintenance. Cependant, des travaux ont pu montrer tout le potentiel de cet outil pour la réalisation d'analyses ergonomiques, notamment pour la conception de situations de travail, de postes de travail en y impliquant directement les opérateurs (Das & Sengupta, 1996 ; Theureau, 1997, Bellies & François, 2016). Il devient alors plus aisé d'étudier les interactions, de connaître le retour d'expériences des futurs opérateurs mais également de

réaliser des études plus justes, plus proches de la réalité et dès lors plus objectives concernant la charge de travail réelle, intégrant cette fois toutes les composantes de l'ergonomie, à savoir cognitive, organisationnelle et physique. De la même façon, la participation de futurs utilisateurs, dans le monde médical, permet de mieux anticiper et « designer » selon Bayramzadeh et al. (2018) des salles d'opérations en simulant, selon les auteurs, des actions, des activités, des flux de personnes... tout ceci, afin d'avoir une vision plus pragmatique de l'ensemble des activités dans un environnement donné, alors qu'on reste dans des situations réalistes et pas encore réelles.

Enfin, nous pouvons également citer les travaux de Roger et al., 2018, conduits au sein de notre équipe de recherche, qui proposent une étude et une analyse statistique, autour d'une population de postiers et une maquette physique modulaire à l'échelle réelle pouvant représenter des concepts de véhicules, afin de déterminer les meilleures positions du siège conducteur afin d'assurer un haut niveau de confort et de bien-être pour monter et descendre du véhicule. La figure 28 montre ainsi, le lien entre la maquette numérique et la maquette physique dite modulaire. En effet, elle est construite à partir de profilés en aluminium permettant de paramétrer les dimensions principales du véhicule telles que la hauteur de l'habitacle ou encore la longueur entre le siège et les pédales. Il suffit alors d'ajouter les éléments du tableau de bord, via des plaques de bois ou de carton, qui se fabriquent et s'installent très rapidement. Cette modularité de la maquette physique a permis de tester un grand nombre de paramètres architecturaux (position du siège, hauteur de l'habitacle, emplacement des dispositifs de commande,...), avec plusieurs postiers, hommes et femmes, de tailles et d'anciennetés différentes,... dans un temps relativement réduit. Une telle simulation en environnement virtuel, alors que l'interaction physique entre produit et utilisateur prédomine, n'aurait pas permis d'obtenir rapidement un résultat aussi concluant. Avec la maquette physique modulaire, il a donc été possible d'obtenir rapidement les meilleurs paramètres pour positionner le siège conducteur et ainsi modifier définitivement le modèle 3D avec les différents acteurs-métiers.

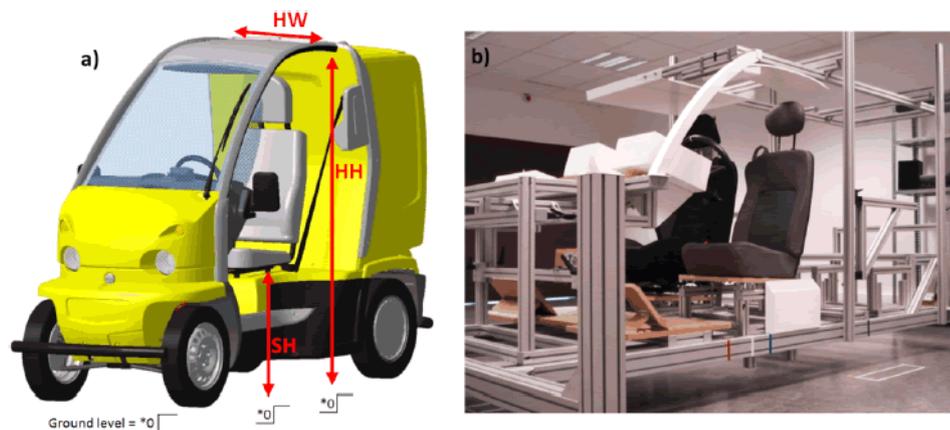


Figure 28 : Maquette numérique (a) et maquette physique modulaire (b) permettant de changer rapidement les dimensions principales du véhicule (Roger et al., 2018) pour assurer des processus de conception plus court permettant de mieux prendre en compte le facteur humain.

Certaines études montrent également des différences significatives en termes d'ergonomie, touchant notamment les dimensions cognitives, organisationnelles et sensorielles (Pontonnier et al., 2014) entre des résultats obtenus sur maquette virtuelle par rapport à ceux obtenus sur maquette physique. Plus particulièrement, les auteurs détaillent une altération de la composante cognitive

entre les situations réelles et virtuelles. Egalement, l'étude soulève une augmentation de la difficulté physique sur la plateforme de réalité virtuelle associée à des dispositifs haptiques. Les auteurs suggèrent ainsi de mieux maîtriser les systèmes haptiques pour améliorer leur applicabilité dans la simulation virtuelle. La maquette physique restant dès lors parmi les outils de simulation les plus efficaces pour étudier l'ensemble des composantes de l'ergonomie.

L'industrie aéronautique, et plus particulièrement notre entreprise pilote, possède également des maquettes physiques qu'elle modifie et optimise au fur et à mesure de la progression du développement et de la conception du produit mais souvent à des fins de design en termes de formes et de solutions techniques. En effet, cette approche de la conception est davantage centrée sur la technique (conception techno-centrée) plutôt que sur l'activité de maintenance en étudiant les interactions possibles entre les opérateurs spécialisés et les composantes de l'architecture étudiée (conception plutôt anthropo-centrée) (Sagot, 1999). La maquette physique a également un autre usage que l'aide à la conception : la formation des opérateurs de maintenance. En effet, certaines formations au sein même des industries aéronautiques utilisent des maquettes physiques en vue de maintenir un niveau de qualification des opérateurs directement dans les chaînes d'assemblage (Bellies & François, 2016).

2.3. Synthèse de l'état de l'art

L'ensemble de l'état de l'art montre que les outils de simulation, numériques et physiques, sont utilisés et largement exploités dans diverses industries comme l'aéronautique ou encore l'automobile. Plus particulièrement, ces outils sont déjà exploités pour réaliser des analyses ergonomiques à des fins de pouvoir mieux intégrer le facteur humain dans la conception de produits, de postes de travail, de tâches, d'outils ou encore d'environnements. Lorsque les acteurs-métiers utilisent des outils numériques tels que le mannequin numérique ou la réalité virtuelle, ils ne s'intéressent qu'à la dimension physique de l'opérateur à travers sa taille, les enveloppes d'atteinte, les efforts...laissant ainsi de côté les composantes cognitives et organisationnelles pourtant indispensables pour analyser, comprendre et transformer une situation de travail (IEA, 2000). En revanche, l'utilisation de maquettes physiques montre au contraire la possibilité de conduire des approches, des analyses ergonomiques autour des composantes physiques, cognitives et organisationnelles de l'ergonomie.

Ainsi, au regard de l'état de l'art, nous présentons les trois outils de simulation dans leur ordre d'apparition classique dans les phases d'étude du processus de conception en maintenabilité, y compris dans notre entreprise pilote :

- **Le mannequin numérique** n'est utilisé par les acteurs-métiers en maintenabilité que pour étudier la composante physique de l'ergonomie. On y retrouve ainsi parmi les paramètres étudiés, ceux touchant l'anthropométrie (taille, volume d'atteinte,...), la biomécanique à travers les angles articulaires, mais aussi d'autres options telles que le champ visuel,....

➤ **La réalité virtuelle** est de plus en plus exploitée au sein des bureaux d'études puisqu'elle est d'abord vue comme un outil collaboratif. Plusieurs études la voient aussi comme un outil efficace pour simuler des activités de travail et mieux étudier ainsi le facteur humain mais là encore, l'approche reste essentiellement centrée sur le composant humain (Human factors)

Pour améliorer les résultats des analyses ergonomiques, et reproduire de vraies contraintes physiques pour l'opérateur immergé par exemple dans une plateforme de réalité virtuelle, deux solutions existent en accord avec les travaux de la littérature (Amundarain et al., 2003 ; Boy, 2018).

La première est un dispositif haptique qui fait appel à un système électromécanique pour donner un retour d'effort à l'utilisateur. Ce système est coûteux et volumineux, il permet principalement d'éduquer aux gestes techniques mais pas toujours de simuler une activité de travail entière lorsque la situation de travail simulée nécessite des déplacements sur la plateforme de réalité virtuelle. Le deuxième est le système tangible qui, quant à lui, semble plus adapté à la simulation de tâches nécessitant des déplacements et une forte variabilité dans les actions conduites par l'opérateur. En effet, l'intégration d'éléments physiques sur la plateforme de réalité virtuelle se fait par l'apport d'objets réels ou maquetés comme nous l'avons vu au travers de la figure 27. Ils sont ainsi munis de capteurs leur permettant d'être synchronisés avec le monde virtuel. Une tâche de maintenance étant composée de sous-tâches qui peuvent être très différentes, l'opérateur immergé peut dès lors exécuter l'ensemble des sous-tâches.

Les systèmes tangibles permettent ainsi une interaction physique et figurative. Cela implique cependant que le niveau de détails des éléments physiques soit élevé et que le monde virtuel soit très réaliste. Par conséquent, la préparation de ces simulations doit être rigoureuse.

➤ **La maquette physique** permet quant à elle de réaliser des analyses ergonomiques très détaillées avec des opérateurs réels, à condition que le niveau de réalisme de la maquette soit élevé et représentatif en termes de volume, forme, masse ou encore de centre de gravité. Il est ainsi possible d'étudier le facteur humain en maintenabilité, notamment à travers l'ergonomie et ses trois composantes définies par l'IEA (2000) : physique, cognitive et organisationnelle.

3. Seconde expérimentation

3.1. Contributions et hypothèses de recherche associées

Sur la base des travaux de la littérature, nous avons pu constater que l'exploitation et l'usage des outils de simulation pour évaluer l'ergonomie varient en fonction du contexte et de l'outil en lui-même puisque plusieurs technologies existent. De plus, au regard des résultats du chapitre 1 du présent travail ; nous avons mis en évidence que l'usage des outils de simulation par les acteurs-métiers du département de maintenabilité de l'entreprise aéronautique pilote, ne permet pas de réaliser des analyses exhaustives relatives au facteur humain. En effet, seule la composante physique de l'ergonomie est étudiée, quel que soit l'outil de simulation utilisé, alors que les composantes cognitives et organisationnelles devraient être également prises en compte afin de bien tenir compte des caractéristiques, des attentes et des besoins des personnes, en l'occurrence les opérateurs dédiés à la maintenance. Ainsi, en accord, d'une part avec les résultats de notre premier chapitre et d'autre part, avec l'état de l'art de ce second chapitre, il ressort que le manque de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers en maintenabilité pourrait induire une sous-exploitation des outils de simulation lorsqu'il s'agit de les utiliser à des fins d'analyses ergonomiques. De plus, le facteur humain est étudié de manière très disparate dans chacune des phases d'étude qui compose le processus de conception en maintenabilité.

Afin de bien comprendre les pratiques actuelles et les éventuelles limites dans l'usage des outils de simulation, nous aurions ainsi pu suivre des études en cours dans le département de maintenabilité dont l'analyse du facteur humain est supportée par un outil de simulation. Or, le contexte industriel ne nous a pas permis de suivre des projets que nous aurions pu comparer par la suite entre eux : même type d'hélicoptère, tâches de maintenance similaires... Ainsi, en accord avec le groupe projet, composé d'un expert en maintenabilité du département concerné, et deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche, il a été décidé d'étudier l'apport de chacun de ses outils de simulation pour réaliser des analyses en facteur humain à travers un protocole expérimental dédié. Dans ce cadre, nous avons décidé d'étudier sur un même hélicoptère, 11 tâches de maintenance récurrentes et représentatives des tâches habituelles en termes de difficulté, de posture, de complexité... avec la participation d'opérateurs réels de maintenance. La mise en place de notre protocole expérimental autour de l'hypothèse H3, détaillé dans les parties qui suivent, doit répondre à notre deuxième contribution :

C2 : Observer, analyser, évaluer, dans l'état actuel des pratiques des acteurs-métiers en maintenabilité en bureau d'études d'un constructeur d'hélicoptères, les limites et les avantages des outils de simulation mis à leur disposition, à des fins d'approche du facteur humain.

- **H3** : dans un contexte de maintenabilité (bureau d'études), les outils de simulation numériques et physiques peuvent se révéler efficaces pour mieux intégrer le facteur humain dans les activités conduites, par des non experts en ergonomie.

3.2. Méthodes et techniques

Pour répondre à nos interrogations et afin d'étudier ce que peut apporter chacun des outils de simulation évoqués et utilisés au sein d'un département de maintenabilité pour mieux prendre en compte le facteur humain, nous proposons de conduire une expérimentation au sein de notre entreprise pilote. Afin d'être le plus rigoureux possible dans notre approche, nous avons souhaité que les outils de simulation utilisés le soient comme les acteurs-métiers en maintenabilité les utilisent dans le cadre de leurs activités quotidiennes. En accord avec notre groupe projet, nous avons choisi de conduire notre expérimentation sur la zone du moteur d'un hélicoptère composé d'une structure classique, c'est-à-dire une structure que l'on retrouve dans la plupart des hélicoptères disponibles sur le marché du secteur. Cette zone nous intéresse tout particulièrement puisqu'elle occasionne une maintenance régulière de la part des opérateurs de maintenance. Nous détaillons dans les parties qui suivent la zone d'étude, les tâches de maintenance sélectionnées pour notre étude et la mise en place du protocole sur l'ensemble de nos trois outils de simulation à savoir : mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique.

3.2.1. Zone d'étude

Notre zone d'étude se trouve sur le plancher mécanique, là où les moteurs sont installés (figure 29). Cette zone nous a particulièrement intéressés car elle concentre à elle seule un ensemble d'activités de maintenance récurrentes et très variées. De nombreuses études de la littérature aéronautique ont également étudié la partie moteur pour effectuer des analyses ergonomiques confirmant l'intérêt de cette zone (Amundarain et al., 2003; Geng et al., 2013; Dmitriev et al., 2015).

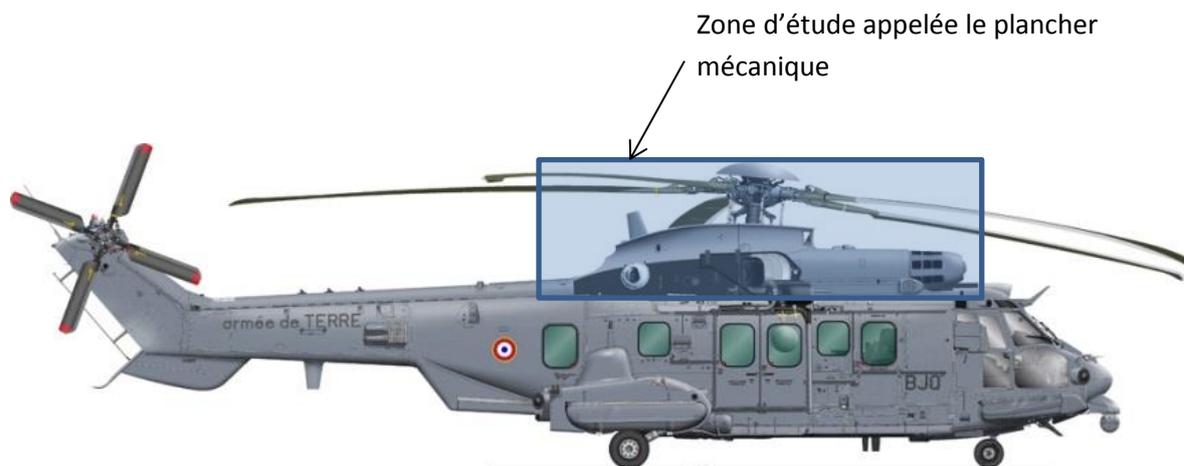


Figure 29 : H225 de l'Armée de terre Française.

Afin d'accéder aux moteurs, une solution est d'installer une nouvelle passerelle permettant à l'opérateur d'accéder au moteur droit ou au moteur gauche. La figure 30 nous montre le dispositif vue de dessus. L'opération de maintenance s'effectuera depuis le couloir de maintenance de la passerelle. Suivant l'agencement des éléments techniques, pas tous symétriques, les opérations de

maintenance se réalisent à gauche comme à droite. Certaines tâches doivent ou peuvent s'effectuer à travers des trappes obligeant à travailler soit debout, accroupi ou encore allongé.

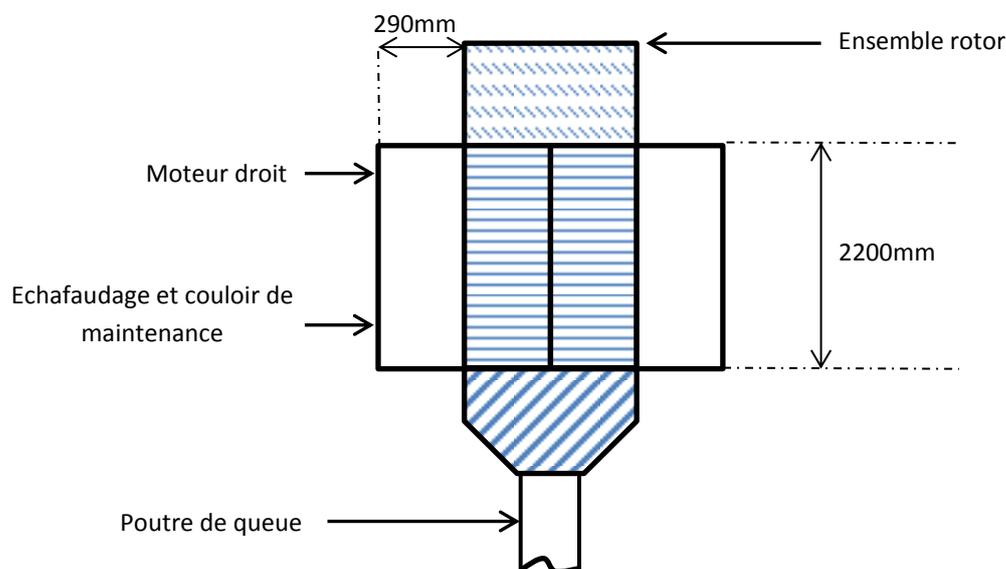


Figure 30 : Schématisation du plancher mécanique et de la passerelle (vue de dessus).

3.2.2. Tâches sélectionnées

Onze tâches de maintenance ont été évaluées sur le plancher mécanique et sont présentées dans le tableau 14 qui suit. Nous avons sélectionné ces tâches en raison de leur récurrence et de leur représentativité parmi les autres tâches de maintenance de l'hélicoptère, notamment en ce qui concerne les paramètres tels que les postures, les gestes et les efforts. En effet, la littérature a bien mis en avant la variabilité des postures pour effectuer la maintenance dans l'aviation (Shi et Liu, 2012; Lu et al., 2015; Lockett & Arvanitopoulos-Darginis, 2017). De plus, les tâches sélectionnées pour cette expérimentation sont incluses dans l'activité de maintenance régulière et obligatoire de l'hélicoptère - la tâche la plus fréquente (tâche 1) est exécutée toutes les semaines et la moins fréquente (tâche 7) a lieu tous les mois. Ces tâches sont également indépendantes les unes des autres, c'est-à-dire qu'elles peuvent être réalisées dans n'importe quel ordre. En outre, toutes les tâches de maintenance ont une durée théorique estimée par la méthode de mesure du temps moyen (MTM) en accord avec les travaux de Laring et al. (2002). Cette durée théorique a été considérée comme une référence dans notre expérimentation pour le comparer avec la durée réelle effectuée par les opérateurs pour réaliser les tâches de maintenance sur la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique.

Tableau 14 : Description de chacune des 11 tâches.

Tâche	Description
1	Accessibilité entre la passerelle et le capot moteur
2	Assemblage/désassemblage d'un alternateur sur le moteur 1 (M1)
3	Assemblage/désassemblage de prises électriques derrière la paroi pare-feu
4	Manipulation du boîtier électrique
5	Assemblage/désassemblage d'une valve hydraulique
6	Accessibilité au collecteur M1
7	Assemblage/désassemblage de l'alternateur M2
8	Assemblage/désassemblage des supports M1
9	Vérifier le couple du RPM
10	Vérifier le couple de la suspension rotor
11	Vérifier le couple de l'actuateur 1

3.2.3. Dispositifs des outils de simulation

Cette partie détaillera les outils de simulation exploités chez notre industriel aéronautique pilote et utilisés dans le cadre de notre expérimentation. Afin de comprendre l'usage actuel de ces outils et de bien comprendre leurs différences, nous les avons utilisés, comme déjà évoqué, tels qu'ils le sont aujourd'hui par les acteurs-métiers en maintenabilité.

3.2.3.1. Mannequin numérique

Le mannequin numérique « Human Builder » a été utilisé. Ce mannequin est l'un des plus utilisés dans le secteur aéronautique puisqu'il est directement intégré au logiciel CATIA de Dassault system. Ce logiciel de Conception Assisté par Ordinateur (CAO) est utilisé pour la conception de chaque hélicoptère, il est connu et bien maîtrisé par l'ensemble des acteurs-métiers du bureau d'études composé d'ingénieurs et de techniciens. Ce mannequin numérique propose des options pour effectuer des analyses ergonomiques et valider l'environnement de conception. On trouve des options pour analyser la dimension physique autour des gestes et postures de l'opérateur avec la méthode RULA (McAtamney, 1993) mais aussi autour de l'approche de l'enveloppe d'atteinte au niveau des membres supérieurs permettant d'étudier les interactions du mannequin avec le produit. Il est également possible de gérer les dimensions anthropométriques du mannequin, option qui servira pour construire une banque de données de mannequins pour la population ciblée.

3.2.3.2. Réalité virtuelle

Nous avons utilisé la technologie de réalité virtuelle déjà disponible et utilisée au sein du département de maintenabilité de notre entreprise pilote. En maintenabilité, la plate-forme de réalité virtuelle est incluse dans le processus de conception et offre une interaction entre l'opérateur et l'environnement immersif comme déjà décrite par de nombreux travaux (Seth et al., 2011; Garza et al., 2013). La plate-forme de réalité virtuelle, appelée RHEA (Realistic Human Ergonomics Analysis), est basée sur le logiciel «Virtools» en assurant un haut niveau de réalisme. Ce logiciel permet un transfert rapide avec le système de CAO (Catia) afin de réduire la boucle itérative dans le processus de conception. Lors de notre expérimentation, le monde virtuel et réel sont synchronisés,

incluant des interactions physiques en accord avec les travaux de Boy (2018). Les composants physiques intégrés à la plate-forme de réalité virtuelle pour cette étude étaient : des éléments pour simuler les contacts avec l'architecture du plancher mécanique et la passerelle, des composants pour l'assemblage / le désassemblage afin de reproduire le volume réel, la masse et le centre de gravité, et un dispositif de suivi (tracking) pour synchroniser les pièces à démonter avec celles du monde virtuel. Certains outillages réels de maintenance, encombrants et complexes tels que des clés dynamométriques, ont également été utilisés. La figure 31 montre la table modulaire reproduisant l'environnement global de plancher mécanique perçu visuellement par l'opérateur dans le monde virtuel. L'opérateur réel et l'avatar dans l'écran ont la même posture.

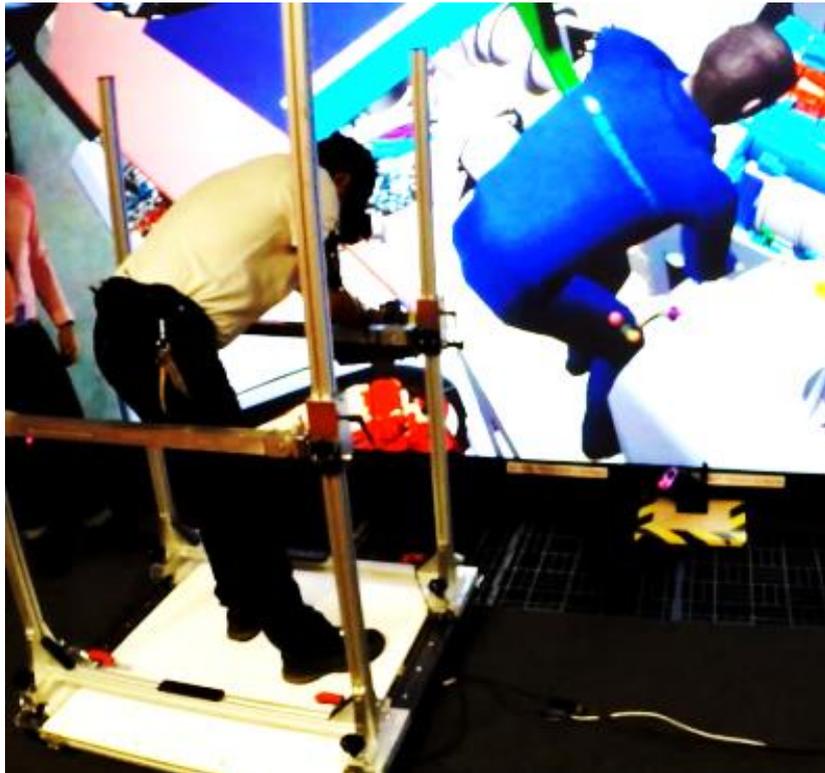


Figure 31 : Eléments physiques intégrés à la plateforme de réalité virtuelle.

3.2.3.3. Maquette physique

La maquette physique conçue spécifiquement pour notre expérimentation est composée de pièces en bois et de composants réels du plancher mécanique, tels qu'un générateur électrique, des prises électriques. Egalement, l'ensemble des outillages de maintenance est à disposition de l'opérateur comme des clés dynamométriques, des douilles, un pied à coulisse, des contre-clés ainsi qu'en témoigne la figure 32.



Figure 32 : Ensemble des outillages de maintenance mis à disposition des opérateurs pour réaliser chacune des 11 tâches de maintenance.

Chaque opérateur effectue donc la tâche dans des conditions réalistes, avec des contraintes d'architecture réelles et les pièces amovibles (poids et centre de gravité réels). Les petits composants amovibles (vis, écrous) ont également été mis en place et la force de couple associée à leur démontage est réaliste.

Pour analyser et traiter l'ensemble des indicateurs ergonomiques que nous définirons plus loin, nous avons placé deux caméras sur les deux outils de simulation faisant intervenir les opérateurs réels pour enregistrer l'activité de maintenance sans perturber l'opérateur. La position de la caméra a été judicieusement placée pour enregistrer les plans frontaux et sagittaux ainsi que tous les déplacements dans et autour de la zone de travail comme illustré sur la figure 33.

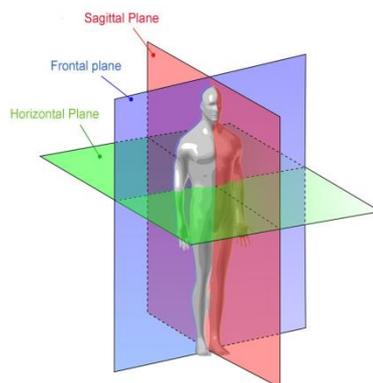


Figure 33 : Plan de référence en anatomie exploité dans le cadre de l'analyse de l'activité de maintenance.

3.2.4. Participants et organisation de l'expérimentation

L'hélicoptère est un produit distribué dans le monde entier et en particulier en Europe. L'activité de maintenance est principalement réalisée par des opérateurs de sexe masculin. Six opérateurs de maintenance ont été sélectionnés conformément à la norme NF EN ISO 15537 intitulée « Principes de sélection et d'utilisation des personnes d'essai pour le contrôle des aspects anthropométriques des produits et modèles industriels ». Nous n'avons pas pu sélectionner davantage d'opérateurs pour notre expérimentation, ni d'opératrices, en raison de contraintes du planning industriel et de la disponibilité des outils de simulation (réalité virtuelle et maquette physique). Deux caractéristiques principales ont été retenues pour notre expérimentation : la stature (l'anthropométrie) et l'expérience de travail en termes de connaissances et de savoir-faire en matière de maintenance spécialisée sur les systèmes de motorisation d'hélicoptères. L'âge moyen et les années d'expérience de travail étaient respectivement de 44,5 ($\pm 7,6$) ans et de 18,5 (± 8) ans. Notons qu'un opérateur, à travers la plateforme de réalité virtuelle, a souffert de symptômes de cinétose, l'obligeant à ne réaliser que quatre tâches sur les onze prévues.

L'expérimentation a débuté sur la maquette physique, chacun des six opérateurs effectuant les onze tâches individuellement pendant deux heures. Entre chaque opérateur, nous avons pris une demi-heure pour reconditionner la maquette physique dans sa configuration initiale. Le même protocole a été déployé au sein de la plateforme de réalité virtuelle six semaines plus tard. Au total, 24 heures d'expérimentation ont été analysées sur la base d'une observation directe et d'un enregistrement vidéo, représentant un volume de 12 heures pour chacune des deux plateformes. Afin de réaliser la troisième expérimentation via le mannequin numérique, une série de paramètres anthropométriques a été mesurée sur les opérateurs réels afin de construire six mannequins numériques qui soient aux dimensions des opérateurs réels. Ces mesures ont été effectuées sur la base de la norme NF EN ISO 7250 "Définition de la mesure de base du corps humain". Trois exemples sont présentés en figure 34. Les six paramètres anthropométriques principaux étaient : la taille, la hauteur trochantérienne, la largeur des épaules (bi-deltaïde), la largeur du bassin (sujet assis), la longueur et la largeur de la main (tableau 15). Dans Catia, nous avons utilisé l'option « éditeur de posture » pour définir le mannequin en ce qui concerne les dimensions anthropométriques de chaque segment du corps et pour ajuster l'angulation de chaque articulation (Neumann, 2006; Hashim et al., 2014).

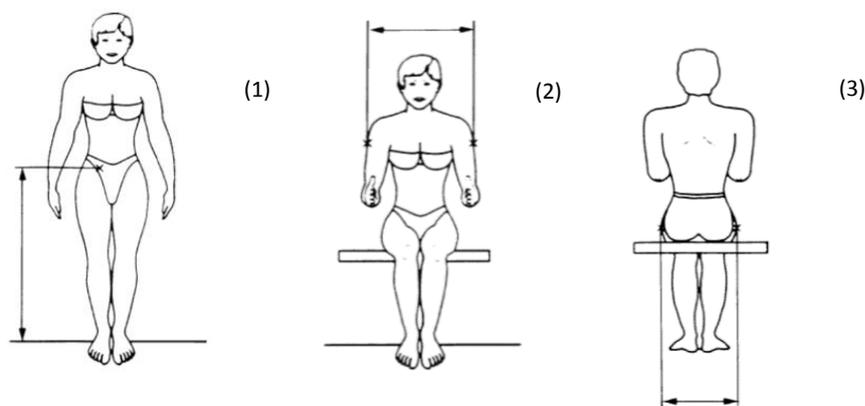


Figure 34 : Exemple des mesures anthropométriques : (1) hauteur trochantérienne, (2) largeur aux épaules, (3) largeur du bassin (assis).

Tableau 15 : Caractéristiques de chaque opérateur et mesures anthropométriques appliquées pour créer les mannequins numériques.

	Age (A)	Experience (A)	Masse (Kg)	IMC (Kg.m ²)	Stature (cm)	Hauteur Trochantérienne (cm)	Largeur épaule (cm)	Largeur bassin (cm)	Longueur main (cm)	Largeur main (cm)
Opérateur 1	42	11	69	25,2	165,5	84	40	31,5	17,2	6,6
Opérateur 2	31	13	70	24,2	170	80	41,2	33,5	18,3	7,4
Opérateur 3	52	22	87	27,8	177	90	43	36,5	21,6	7,8
Opérateur 4	45	24	76	23,9	178,5	95	43	33	19,8	7,8
Opérateur 5	46	11	82	24,5	183	97	44,3	35,9	20,6	9,6
Opérateur 6	51	30	105	31,0	184	102	48,4	38,7	19,4	8,6
Moyenne (ET)	44,5 (7,6)	18,5 (8,0)	81,5 (13,4)	26.1 (2,8)	176,3 (7,3)	91,3 (8,3)	43,3 (2,9)	34,9 (2,7)	19,5 (1,6)	8,0 (1,0)

Nous avons divisé notre analyse en deux parties: (1) comparer les outils de simulation faisant intervenir les opérateurs réels (réalité virtuelle et maquette physique) en considérant sur la base des travaux de la littérature et en accord avec le groupe projet, sept indicateurs ergonomiques communs avec la participation des opérateurs réels et (2) en comparant trois outils de simulation (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique) en évaluant trois indicateurs ergonomiques communs parmi les sept étudiés initialement. Le mannequin numérique ne faisant évidemment pas intervenir un opérateur réel dans sa simulation, seule la composante physique est analysée. La partie qui suit décrit les indicateurs ergonomiques communs et les outils d'analyses utilisés dans l'expérimentation.

3.2.5. Indicateurs ergonomiques et outils associés analysés

L'activité de l'opérateur a été analysée sur la base de deux activités de maintenance souvent étudiées en maintenabilité : le désassemblage et l'assemblage, définis comme la capacité d'un opérateur à désassembler et à assembler un système mécanique (De Leon et al., 2012). Nous avons sélectionné sept indicateurs ergonomiques pour analyser ces activités, ce qui a permis de couvrir l'ensemble des composants humains spécifiques dans les caractéristiques de l'interaction humaine dans le système Homme-Machine-Environnement, en accord avec l'IEA (2000). Les paramètres et/ou outils de mesure exploités pour quantifier les indicateurs ergonomiques ont été :

- **L'enveloppe d'atteinte** : nous avons mesuré le pourcentage de temps pendant lequel l'opérateur atteint la zone de maintenance à travers la réalité virtuelle et la maquette physique. Pour le mannequin numérique, «l'enveloppe d'atteinte» a été analysée et mesurée à travers un pourcentage de temps théorique à l'aide de la méthode « Mean Time Measurement » (MTM). L'option du mannequin numérique propose une évaluation de l'enveloppe d'atteinte en simulant une enveloppe virtuelle autour du mannequin (Neumann, 2006; Guan et al., 2012; Hashim et al., 2014), comme illustré sur la figure 35 qui suit.

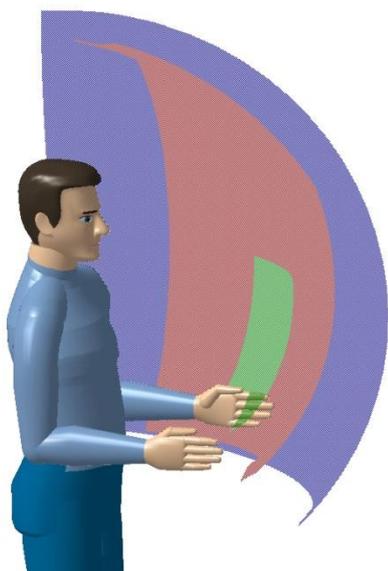


Figure 35: Le mannequin numérique "Human Builder" avec l'option "enveloppe d'atteinte". L'option est ici déclenchée sur la main gauche. Nous pouvons observer trois enveloppes d'atteinte : vert (atteinte la moins contraignante pour les articulations); rouge (atteinte comprenant l'élévation du bras au-dessus de la tête); bleu (atteinte comprenant les mouvements dorso-lombaires).

- La **méthode RULA** évalue l'**exposition des membres supérieurs aux risques de troubles musculo-squelettiques** (TMS). Elle tient compte de trois indicateurs principaux : la posture, la force et la fréquence (McAtamney, 1993). Cet outil a permis de mesurer les gestes et postures des opérateurs à l'aide d'une check-list papier sur la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. L'option d'évaluation de la posture, disponible dans le logiciel Catia, permet d'évaluer les postures du mannequin numérique en générant un score calculé de la même manière qu'à travers la méthode papier RULA (Guan et al., 2012; Vyavahare, R. T. et Kallurkar, 2015).
- **L'échelle de Borg** (Borg, 1982) a été utilisée pour **mesurer l'effort perçu** au cours des activités physiques conduites. Sa version récente CR10 évaluée de 0 (aucun effort) à 10 (très difficile) a été retenue uniquement pour les deux outils de simulation faisant intervenir un opérateur réel.
- Pour évaluer **la sécurité au travail**, la fiche d'évaluation des conditions et de l'organisation du travail APACT (**méthode APACT** pour Association Pour l'Amélioration des Conditions de Travail) a été utilisée, comme déjà recommandée par Chitescu et al. (2003) pour des travaux similaires conduits au sein de l'équipe ERCOS. Elle est composée de 22 paramètres étudiant diverses caractéristiques comme la dimension physique ou encore environnementale avec le bruit et la luminosité. Dans notre cas nous avons utilisé le paramètre 9 correspondant à la "sécurité au travail" pour évaluer les risques associés au travail en hauteur, aux chutes, aux brûlures ou aux défaillances de sécurité en combinant le niveau d'équipement de protection individuelle et l'inviolabilité de la protection du travail. La note est classée de 0 à 10 et considérée comme pénalisante en dessous de 6,5. Cette fiche APACT sera utilisée pour l'ensemble des trois outils de simulation.
- **NASA-TLX** (Hart & Staveland, 1988) est un questionnaire d'**évaluation subjective de la charge mentale de travail** basée sur six dimensions : exigence mentale, exigence physique, exigence de temps, performance personnelle, frustration et stress. Il fournit une note globale notée de 0 à 100, spécifiant si la charge de travail mental est faible (≤ 30) ou élevée (≥ 30). Le NASA-TLX doit être rempli par l'opérateur de maintenance immédiatement après avoir réalisé la tâche de maintenance. Cet outil sera donc utilisé pour les outils de simulation faisant participer des opérateurs, la réalité virtuelle et la maquette physique.
- **Questionnaire nordique** (Kuorinka et al., 1987): une silhouette corporelle des régions musculo-squelettiques basée sur le questionnaire standardisé Nordique a été utilisée pour mettre en avant **les douleurs musculo-squelettiques** pouvant être ressenties par les opérateurs au cours de leurs activités de maintenance. Ce questionnaire a également été rempli par l'opérateur à la suite de la simulation de la tâche de maintenance, il sera donc exploité pour la réalité virtuelle et la maquette physique.

Le tableau 16 qui suit traduit l'ensemble des indicateurs ergonomiques avec l'outil de mesure associé pour chacun des outils de simulation étudiés (le mannequin numérique (MN), la réalité virtuelle (RV) et la maquette physique (MP)).

Tableau 16 : Indicateurs ergonomiques et outils associés, dans l'étude et la conception de tâches de maintenance avec l'usage des mannequins numériques (MN), de la réalité virtuelle (RV) et de la maquette physique (MP).

Indicateurs ergonomiques	Outils de mesure RV & MP	Outils de mesure MN	Métrique
Posture	Reach envelop (Vidéo / photo)	Reach envelop (option logiciel)	% (time)
	RULA ¹ (version papier)	RULA ¹ (option logiciel)	Echelle de 1 à 7
Symptômes de troubles musculo-squelettiques	Questionnaire : zonage des douleurs ressenties sur le corps (extrait du Nordique)	/	Nuque
			Epaules
			Haut du dos
			Coudes
			Lombaires
			Poignets / mains
			Hanches /cuisses
			Genoux
			Chevilles / pieds
Effort	Echelle de Borg	/	Echelle de 0 à 10
Sécurité aire de travail	APACT ² check-list (section 9)	APACT ² check-list (section 9)	Echelle de 0 à 10
Temps	Duration	/	Durée de la tâche
Charge mentale	NASA-TLX ³	/	Echelle de 0 à 10

¹Rapid Upper Limb Assessment

²Association for Improvement of Working Conditions

³ National Aeronautics and Space Administration – Task Load Index

Nous avons utilisé le test non paramétrique de Friedman et Wilcoxon en raison de la taille de l'échantillon assez petit et des variables dépendantes (même population à travers les trois outils de simulation). Les différences de durée d'exécution pour effectuer chacune des onze tâches de maintenance ont été testées entre trois variables (la durée d'exécution théorique, la durée d'exécution via la plate-forme de réalité virtuelle (RV) et via la maquette physique (MP)) par le test de Friedman. Les variables communes (RULA et score de sécurité au travail) entre les trois situations (MN, RV et MP) ont également été analysées par le test statistique de Friedman. Le test de Wilcoxon non paramétrique a été utilisé pour comparer des indicateurs tels que les symptômes musculo-squelettiques, la charge mentale de travail et l'effort physique perçu entre les paramètres de RV et de MP. L'analyse statistique a été réalisée dans SPSS 24.0 (IBM), et une valeur $p \leq 0,05$ a été considérée comme significative.

3.3. Présentation des résultats

Tout d'abord, tâche par tâche, nous avons observé des différences dans la durée d'exécution au travers des outils de simulation : mannequin numérique (durée théorique estimée par la méthode

MTM), réalité virtuelle et maquette physique (durée d'exécution évaluée avec des opérateurs réels). Cette différence est statistiquement significative pour neuf tâches (Figure 36). Nous observons des variations dans les durées d'exécution entre la réalité virtuelle et la maquette physique. Par exemple, la durée d'exécution de la tâche 1 est de 7,6 ($\pm 0,3$) secondes sur la maquette physique, alors qu'elle est plus longue (plus de 20 fois) sur la plate-forme de réalité virtuelle (164,7 ($\pm 12,3$) secondes). Nous avons observé le phénomène inverse pour la tâche 10 (393,2 ($\pm 68,1$) secondes sur la plate-forme de réalité virtuelle et 168,4 ($\pm 11,3$) secondes sur la maquette physique (un rapport de 2). La figure 18 présente l'ensemble des résultats.

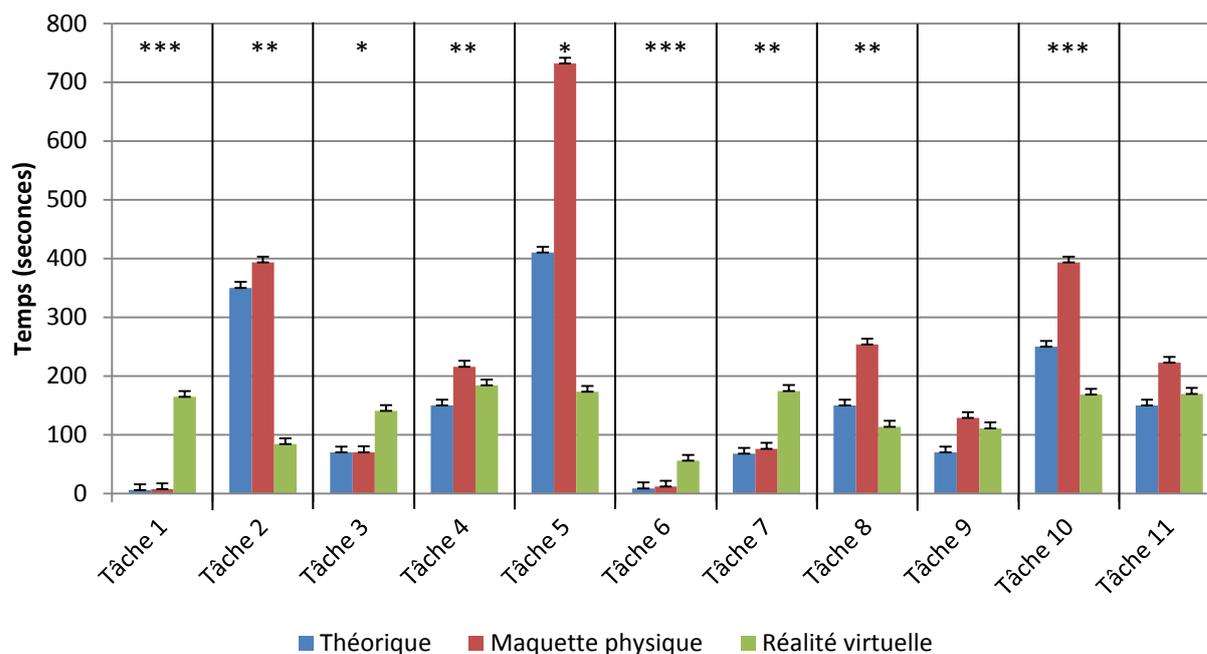


Figure 36 : Durées d'exécution observées (en secondes) de onze tâches de maintenance sur maquette physique, et réalité virtuelle. Durée théorique d'exécution (en secondes) estimée par la méthode de mesure du temps moyen (MTM) fournie pour chaque tâche (Friedman, *: $p \leq 0,05$; **: $p \leq 0,01$; ***: $p \leq 0,001$).

Nous avons comparé les différents indicateurs ergonomiques testés sur les outils de simulation de la réalité virtuelle et de la maquette physique, avec la participation des opérateurs réels. Il ressort tout d'abord que les scores RULA et le score du paramètre 8 (Sécurité aire de travail) de la fiche APACT, ne présentent aucune différence significative entre ces deux outils de simulation. Sur l'ensemble des résultats concernant les douleurs musculo-squelettiques, seul le bas du dos (lombaires) et les genoux représentent, en moyenne, des scores élevés en termes de ressenti par les participants. Egalement, la douleur ressentie dans la partie dorso-lombaire est significativement différente entre la simulation sur la plateforme de réalité virtuelle et celle sur la maquette physique mais uniquement pour la tâche 8 (tableau 17). En effet, pour cette tâche, aucun des opérateurs n'a ressenti une douleur sur la plateforme de réalité virtuelle alors que sur la maquette physique, tous les opérateurs ont ressenti une douleur au niveau des lombaires. Le reste des parties corporelles analysées n'a eu qu'un score faible, sans différence significative entre les deux outils de simulation. L'effort physique perçu sur l'échelle de Borg et la charge mentale de travail évaluée par la méthode NASA-TLX ont été comparés tâche par tâche pour chacun des outils de simulation. Le test de Wilcoxon n'a montré aucune différence significative entre les résultats de l'échelle de Borg et ceux

du NASA-TLX. Cependant, nous avons pu observer que le score de la charge mentale est toujours plus élevé pour la réalité virtuelle que pour la maquette physique pour chacune des onze tâches sans que cet écart ne soit significatif.

Tableau 17 : Douleurs musculo-squelettiques ressenties, effort physique perçu (échelle de Borg) et charge mentale de travail (NASA-TLX) pour chaque tâche de maintenance retenue effectuée sur la plateforme de réalité virtuelle et sur la maquette physique ($p \leq 0.05$).

Indicateurs ergonomiques	Tâches de maintenance	N	Réalité virtuelle Moyenne (ET)	Maquette physique Moyenne (ET)	
Symptômes musculo-squelettiques	1	6	0 (0)	0 (0)	
	2	6	0.5 (0.1)	0.7 (0.1)	
	3	5	0.4 (0.1)	0 (0)	
	4	5	0.2 (0.1)	0.2 (0.1)	
	5	5	0.2 (0.1)	0.2 (0.1)	
	Lombaires	6	6	0 (0)	0 (0)
	7	5	0 (0)	0.2 (0.1)	
	8	5	0 (0)	1 (0)	
	9	5	0.2 (0.1)	0.4 (0.1)	
	10	6	0 (0)	0.7 (0.1)	
	11	5	0.2 (0.1)	0.4 (0.1)	
Echelle de Borg	1	6	0 (0)	0 (0)	
	2	6	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	
	3	5	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	
	4	5	0.4 (0.1)	0 (0)	
	5	5	0.2 (0.1)	0.6 (0.1)	
	Genoux	6	6	0.3 (0.1)	0.2 (0.1)
	7	5	0 (0)	0.2 (0.1)	
	8	5	0.4 (0.1)	0.2 (0.1)	
	9	5	0.4 (0.1)	0.2 (0.1)	
	10	6	0.3 (0.1)	0.3 (0.1)	
	11	5	0.4 (0.1)	0.6 (0.1)	
Charge mentale (NASA-TLX)	1	6	1.8 (0.3)	0.8 (0.2)	
	2	6	5.7 (0.6)	4.5 (0.4)	
	3	5	2.2 (0.3)	1.1(0.2)	
	4	5	2.4 (0.3)	2 (0.3)	
	5	5	3 (0.3)	3.4 (0.3)	
	6	6	1.8 (0.2)	1.9 (0.3)	
	7	5	2.5 (0.3)	2.4 (0.3)	
	8	5	3 (0.2)	3.2 (0.4)	
	9	5	3.2 (0.3)	1.3 (0.2)	
	10	6	3.8 (0.3)	5.2 (0.6)	
	11	5	3.4 (0.3)	3 (0.2)	

Les tâches 2 et 10 ont reçu les scores les plus élevés - quel que soit l'outil de simulation - en raison du temps assez long pour réaliser les tâches et de l'accessibilité difficile associée à un effort statique pour tenir en équilibre un alternateur pesant 18 kg. Un effort statique prolongé a rapidement causé une douleur; l'opérateur était agacé et souhaitait accomplir sa tâche le plus rapidement possible, ce qui a contribué à alourdir sa charge mentale. Les tâches 1 (déplacement entre le moteur et la passerelle) et la tâche 9 (couple de contrôle et de serrage) ont été les plus faciles, nécessitant peu d'effort physique. On observe cependant que la charge mentale moyenne a augmenté de 16 points pour la réalité virtuelle.

Parmi les sept indicateurs ergonomiques, trois sont communs avec le mannequin numérique : l'enveloppe d'atteinte, le score RULA et la sécurité au travail. L'étude de l'enveloppe d'atteinte entre le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique n'a pas mis en évidence de différences significatives, car elle a systématiquement donné un score optimal de 100% pour les onze tâches de maintenance et les six opérateurs. Pour le score RULA, seules cinq tâches (1, 3, 4, 6 et 11) ont montré une différence significative entre les trois outils de simulation (Tableau 18). Cinq tâches ont montré des différences significatives entre les trois outils de simulation pour les paramètres de sécurité au travail (tableau 18). Pour ces cinq tâches (2, 3, 5, 6 et 7), nous avons observé des caractéristiques similaires avec un espace de travail suffisant pour déplacer le mannequin dans différentes postures (figure 37). Cependant, l'environnement de travail a été davantage contraint pour le reste des tâches (2, 5, 7, 8, 9 et 10) et le mannequin a dû être placé de manière intuitive puisque l'acteur-métier n'avait que très peu de possibilités pour positionner le mannequin numérique.



Figure 37 : Opérateur effectuant la même tâche (2) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La même posture est observée.

Le score de sécurité au travail pour la tâche 3 est de 7 sur la plateforme de réalité virtuelle ainsi que sur la maquette physique mais de 5,4 pour le mannequin numérique, indiquant des risques mineurs dans la zone de travail. Cependant, le score de sécurité au travail est inférieur à 6,5 pour le reste des tâches sur les trois outils de simulation, atteignant 4 pour 24% des tâches (indiquant un risque significatif pour les opérateurs).

En comparant les trois outils de simulation, il est possible de montrer que certaines tâches de maintenance n'ont pas pu être reproduites de manière satisfaisante (Figure 38), en particulier pour les tâches 3 et 6. Ces tâches présentent une différence significative entre le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique pour les indicateurs de sécurité au travail et le score RULA. Les tâches 3 et 6 ont toutes les deux visé à manipuler un générateur électrique et un drain

hydraulique. Pour la tâche 6, la manipulation du collecteur de drains est effectuée à partir de la plate-forme, sans réelle contrainte environnementale (structure de l'hélicoptère, câble...). L'accessibilité médiocre et la posture inconfortable qui en résultent, ont été les facteurs de risques courants pour les tâches 3 et 6. Les opérateurs de maintenance ont dû travailler dans une posture agenouillée et passer le haut du corps à travers de nombreux fils électriques, conduites hydrauliques et systèmes mécaniques.

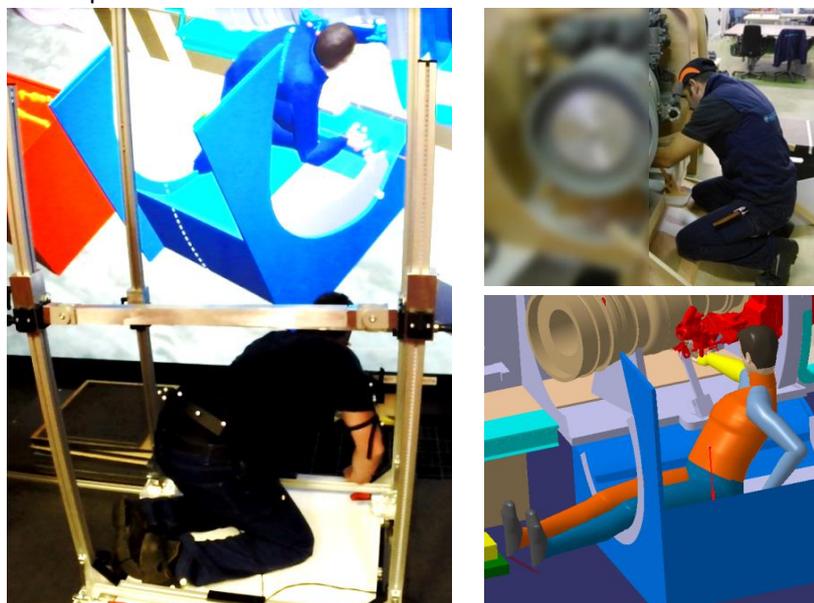


Figure 38 : Opérateur effectuant la même tâche (6) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La posture est différente pour le mannequin numérique.

Tableau 18 : Comparaison des trois outils de simulation basée sur les scores RULA et les indicateurs de sécurité au travail pour chaque tâche (Test de Friedman: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$).

Indicateurs ergonomiques	Tâche	N	Mannequin numérique Moyenne (ET)	Réalité virtuelle Moyenne (ET)	Maquette physique Moyenne (ET)	Ecart
Le score RULA	1	6	3.3 (0.3)	2.5 (0.3)	2.7 (0.3)	*
	2	6	6.8 (0.2)	7 (0)	7 (0)	
	3	5	5.8 (1.2)	7 (0)	7 (0)	**
	4	5	6.3 (0.3)	7 (0)	7 (0)	*
	5	5	6.8 (0.2)	7 (0)	7 (0)	
	6	6	5.5 (0.7)	4.2 (0.2)	4.2 (0.1)	**
	7	5	7 (0)	3.9 (0.2)	4 (0)	
	8	5	7 (0)	7 (0)	7 (0)	
	9	5	6 (0.4)	4 (0)	4 (0)	
	10	6	6.2 (1.3)	7 (0)	7 (0)	
	11	5	6.7 (0.3)	7 (0)	7 (0)	*
Indicateur de sécurité au travail	1	6	4 (0)	4 (0)	4 (0)	
	2	6	5.7 (0.3)	6.5 (0.3)	6.5 (0.3)	*
	3	5	5.4 (0.3)	7 (0)	7 (0)	***
	4	5	4.8 (0.2)	5 (0)	5 (0)	
	5	5	5.6 (0.3)	6.4 (1.8)	4.4 (1.8)	**
	6	6	4.8 (0.2)	4 (0)	4 (0)	***
	7	5	6 (0)	4.4 (0.8)	4.4 (0.8)	**
	8	5	5 (0)	4.4 (0.8)	4.4 (0.8)	
	9	5	6 (0)	6 (0)	6 (0)	
	10	6	4 (0)	4 (0)	4 (0)	
	11	5	6 (0)	6 (0)	6 (0)	

4. Discussion

Cette étude vise à évaluer chacun des outils de simulation connus et exploités par les personnes en maintenabilité, que sont le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique, à des fins d'approches et d'analyses ergonomiques pour des tâches de maintenance définies. Nous avons évalué, pour chacun de ces outils, les mêmes 11 tâches de maintenance avec les mêmes opérateurs au sein même de notre entreprise pilote. Ainsi, les opérateurs réels ont participé aux expérimentations sur la plateforme de réalité virtuelle et sur la maquette physique. Nous avons reproduit leurs caractéristiques anthropométriques sur les mannequins numériques. Ainsi, nous avons pu observer des différences entre les trois outils de simulation, concernant les indicateurs ergonomiques évalués. Nous avons constaté que la différence, pour la majorité des indicateurs ergonomiques étudiés tâche par tâche, n'était significative que pour la durée d'exécution entre la réalité virtuelle et la maquette physique. Le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique, ont également fait ressortir un score différent pour l'évaluation de la posture (RULA) et des indicateurs de sécurité pour plusieurs tâches.

Nous nous proposons de discuter, dans un premier temps, sur les différences observées entre la réalité virtuelle et la maquette physique. Il ressort, que la durée d'exécution des tâches 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 10 entre la durée théorique estimée par la méthode MTM et l'exécution réelle des tâches sur la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique est significativement différente. Seules deux tâches ne présentent pas de différences significatives (tâche 9 et 11) car il s'agissait de tâches simples (avec des séquences de travail peu nombreuses, simples, courtes et sans effort significatif) et la durée théorique a été correctement estimée. L'estimation de la durée d'exécution pour chaque tâche est donc variable suivant l'évaluation théorique, la durée d'exécution sur la plateforme de réalité virtuelle et la durée d'exécution sur la maquette physique. Par exemple, nous avons observé que la durée d'exécution de certaines tâches est plus longue sur la plate-forme de réalité virtuelle que sur la maquette physique. En effet, la perception de l'environnement virtuel peut entraîner une gêne pour les opérateurs. Dans notre étude, la perception spatiale n'est pas réaliste en raison du décalage entre la perception de l'environnement réel (que les opérateurs de maintenance connaissaient déjà) et la perception sur la plate-forme de réalité virtuelle. En effet, la surface de travail disponible dans la salle de réalité virtuelle n'a pas permis de réaliser l'entièreté des déplacements nécessaires et perçus dans le monde virtuel. Certaines tâches de maintenance (tâches 1, 3, 6 et 7) nécessitaient un vaste volume d'espace de travail dans la salle de réalité virtuelle pour assurer le même déplacement sur le volume d'espace de travail perçu dans l'immersion numérique. Le volume physique de la plate-forme de réalité virtuelle limitant les mouvements / déplacements des opérateurs, ils ont donc dû réfléchir et choisir des stratégies pour atteindre la destination finale dans l'immersion numérique. Les travaux de Loomis & Philbeck, 2008, expliquent qu'un des enjeux majeurs dans la simulation de l'activité de travail en réalité virtuelle est l'amélioration de la perception spatiale. L'amélioration du graphisme, de la profondeur de champs et de l'échelle des objets virtuels visualisés contribue à réduire l'écart en réel et virtuel. Egalement, les travaux de Burns, 2018, évoquent l'émergence de nouvelles technologies, telles que la réalité mixte, qui devrait pouvoir atténuer cette problématique. La réalité mixte doit en effet pouvoir faire passer l'opérateur d'une situation totalement immergée (réalité virtuelle) à une situation de réalité mixte. Avec cette

solution, un opérateur qui aurait des difficultés à se repérer dans le monde virtuel pourrait passer quelques minutes en réalité mixte afin de se raccrocher à des éléments réels, pour ainsi retrouver une bonne perception spatiale avant de se replonger dans le monde virtuel. De plus, la perception de l'environnement pourrait être améliorée par la qualité graphique de la conception assistée par ordinateur (CAO) transférée vers la plateforme de réalité virtuelle, ainsi que par les graphismes affichés à l'intérieur du casque, offrant des fonctionnalités techniques optimisées telles qu'un champ de vision plus réaliste (Bowman & McMahan, 2007). Par ailleurs, plusieurs tâches ont nécessité une durée d'exécution plus longue sur la maquette physique par rapport à la durée d'exécution sur la plateforme de réalité virtuelle. En effet, pour ces tâches, la représentation des contacts et des efforts physiques a été beaucoup moins importante que sur la maquette physique. Par exemple, le serrage de boulons est une tâche fréquente dans la maintenance, mais nous ne pouvons pas reproduire cette tâche contraignante dans la plate-forme de réalité virtuelle. En effet, simuler une telle tâche nécessite de mettre en place un système proche du réel pouvant résister à des efforts de couples élevés. Les travaux Lawson et al. (2016) ont déjà détaillé ces exigences spécifiques sur la réalité virtuelle en évoquant la nécessité de trouver une solution technique permettant de synchroniser rapidement dans l'espace une clé dynamométrique virtuelle avec une clé dynamométrique réelle.

Ainsi, le développement et l'intégration d'éléments physiques dans la plateforme de réalité virtuelle pourraient améliorer l'efficacité de la simulation et réduire l'écart entre la simulation réelle et numérique. En accord avec les travaux Menezes et al., 2018, qui insistent sur l'efficacité de l'intégration d'éléments physiques sur une plateforme de réalité virtuelle, nous avons inséré dans la plateforme de réalité virtuelle des pièces physiques. Ces éléments physiques représentent les contacts primaires (parois, trappes etc) et des pièces mobiles avec un système de « tracking » (clé dynamométrique réelle et alternateur) afin de reproduire les efforts, de manière similaire à la maquette physique ainsi qu'en témoigne la figure 39 avec la manipulation d'une clé dynamométrique réelle.



Figure 39 : Usage d'une clé dynamométrique réelle sur la plateforme de réalité virtuelle.

Cependant, plusieurs études ont proposé des systèmes alternatifs à l'intégration d'éléments réels ou maquetés sur la plateforme de réalité virtuelle telle que le système haptique. Ce système peut améliorer la qualité de la simulation sur une plateforme de réalité virtuelle dans les industries

aéronautiques (Savall et al., 2002), médicales (Wang et al., 2017) et automobiles (Langley et al., 2016). Or, cette technologie est coûteuse, ce qui justifie d'exploiter le potentiel de la technologie, actuellement déployée, de « tracking » (Meier et Holzer, 2015; Riley, 2016). L'utilisation de pièces réelles avec des capteurs est moins chère que le système haptique tout en fournissant une évaluation ergonomique plus réaliste. En effet, un système haptique est davantage utilisé pour éduquer les gestes mais limite les déplacements de l'opérateur sur une zone de travail qui peut être assez large en maintenance. Egalement, comme notre simulation, la variabilité des tâches entraîne des comportements très divers qui ne peuvent être assumés par un système haptique. En effet, nous étudions ici une activité de travail où se succèdent 11 sous-tâches de maintenance différentes. Un système haptique seul ne permet pas d'assurer l'ensemble de la simulation et des sous-tâches associées.

La durée d'exécution sur la plateforme de réalité virtuelle s'est également révélée plus longue que la durée théorique en raison de l'adaptation de l'opérateur au monde virtuel et aux interactions associées. Bien que les participants à notre étude aient été formés et immergés dans la plateforme de réalité virtuelle une semaine avant l'expérimentation, ils ont été perturbés au début de l'expérimentation, et ils ont eu besoin de quelques minutes pour se repérer et s'adapter à l'environnement virtuel en tenant compte de leurs connaissances du monde réel. Egalement, le mal des transports, appelé cinétose, en particulier lors d'une longue immersion virtuelle, est apparu comme un problème non négligeable. Les travaux de Chen et al., 2017, évoquent cette problématique qu'ils considèrent comme majeure et devant être résolue prioritairement pour améliorer les expériences du monde virtuel. Une pause entre les tâches a été nécessaire sur la plateforme de réalité virtuelle pour qu'un des six opérateurs puisse poursuivre l'expérimentation sans être atteint de nausées. Dans ce cas spécifique, la séquence de travail réalisée peut ne pas être réaliste sur la plateforme de réalité virtuelle car un opérateur ne fait pas toujours des pauses entre chaque sous-tâche sur un hélicoptère réel.

Egalement, l'évaluation des autres indicateurs ergonomiques (posture, force, critères de sécurité, charge mentale et symptômes de troubles musculo-squelettiques) n'a pas été significativement différente entre la réalité virtuelle et la maquette physique dans cette étude. Le réalisme des contacts et des efforts associés avec des pièces réelles sur la plateforme de réalité virtuelle, se superposant et se synchronisant avec le monde virtuel a permis de ne pas avoir d'écarts significatifs. L'étude de Seth et al., 2011, précise que pour la simulation d'une séquence d'assemblage, l'ajout d'éléments physiques sur une plateforme de réalité virtuelle contribue à réduire l'écart avec le réel. Egalement, les études de Pontonnier et al., 2014, ont montré une différence entre la réalité virtuelle et la maquette physique pour évaluer les indicateurs ergonomiques lorsque les contacts physiques et les retours haptiques n'étaient pas présents sur la plateforme de réalité virtuelle.

Nous comparons maintenant les résultats des indicateurs ergonomiques obtenus sur les 3 outils de simulation, c'est-à-dire le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique. L'étude de l'enveloppe d'atteinte entre les trois outils de simulation n'a pas mis en évidence de différences significatives, car elle a systématiquement donné un score optimal de 100% pour les onze tâches de maintenance et les six opérateurs. En effet, chacune des onze tâches a permis à chaque opérateur, quelles que soient leurs dimensions anthropométriques, de se positionner juste à

côté des pièces à travailler. Cependant, cinq tâches ont montré une différence significative pour le score RULA et les indicateurs de sécurité entre le mannequin numérique par rapport à la réalité virtuelle et la maquette physique. Ce constat met, dès lors, le mannequin numérique comme la cause de cette différence, notamment au regard de la comparaison entre la réalité virtuelle et la maquette physique qui ne faisait pas ressortir de différences significatives pour les composantes physiques et organisationnelles de l'ergonomie. Ces tâches concernent les situations de travail spécifiques où les opérateurs, avec l'ensemble de leur corps, doivent généralement être en contact physique avec l'environnement. Cependant, lorsque les acteurs-métiers ont évalué ces situations sur le mannequin numérique, ils ne disposaient pas d'informations techniques suffisantes, plus particulièrement sur les contacts autorisés entre les différentes parties de l'architecture de l'hélicoptère et l'opérateur. Ce manque d'informations peut s'expliquer par la phase préliminaire du processus de conception dans laquelle le mannequin numérique est principalement utilisé. Selon Pistikopoulos et al., 2000, la définition de la situation de travail n'est pas optimale dans cette phase et les informations transmises à l'acteur-métier en maintenabilité changeront chaque jour en raison du processus itératif. Par exemple, l'acteur-métier a mis le mannequin numérique en contact avec une paroi pare-feu (tâche 4), mais ce contact était proscrit car la fragilité de cette pièce ne tolérait que très peu d'efforts. Par conséquent, la posture de la tâche 4 est plus confortable à travers le mannequin numérique que dans la réalité virtuelle et la maquette physique puisque dans ces deux derniers outils l'opérateur savait qu'il ne pouvait pas s'appuyer dessus. Cela explique que le score RULA est plus bas sur le mannequin numérique puisque la posture est moins contraignante. Le manque de communication sur les informations techniques entre les différents bureaux d'études et les acteurs-métiers en maintenabilité effectuant l'analyse pourrait également expliquer les différences observées par les indicateurs de sécurité entre les tâches réalisées avec le mannequin numérique et celles réalisées avec la réalité virtuelle et la maquette physique. Par exemple, nous avons observé le même comportement, la même posture et le même contact avec l'environnement entre les trois outils de simulation (figure 40) pour la tâche 2 (démontage / montage d'un alternateur pesant 18 kg). Cependant, l'analyse du mannequin numérique n'a pas soulevé de risques pour la sécurité : l'arête du pare-feu était pourtant coupante et il existait un vrai risque de chute en raison de potentiels résidus d'huile sur le sol (expliquant pourquoi le score de sécurité est favorable sur l'analyse du mannequin numérique).



Figure 40 : Opérateur effectuant la même tâche (2) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La même posture est observée.

Nous avons également observé au sein de notre entreprise que l'ingénieur ou le technicien en maintenabilité effectue l'analyse ergonomique d'une tâche de maintenance à travers le mannequin numérique indépendamment des autres tâches pouvant être réalisées dans la même zone de travail, signifiant que l'étude exclut les autres tâches de maintenance de cette zone. Des travaux de recherche montrent d'ailleurs, l'usage des mannequins numériques pour étudier des tâches de maintenance indépendamment des autres tâches d'une même zone (De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014). L'analyse tâche par tâche, zone par zone, à travers le mannequin numérique constitue le paradigme également observé dans notre industrie aéronautique. Or, comme nous l'avons expliqué précédemment, le manque d'informations ne rend pas efficace l'analyse de maintenabilité et l'intégration du facteur humain tâche par tâche. C'est pourquoi nous proposons de modifier ce paradigme pour l'étude avec le mannequin numérique. Nous soumettons ainsi d'effectuer plusieurs analyses de maintenabilité intégrant le facteur humain pour une même zone de travail regroupant plusieurs tâches de maintenance. Les indicateurs ergonomiques peuvent être évalués sur le mannequin numérique par zone de travail en sélectionnant et en simulant diverses tâches de maintenance. Ce nouveau paradigme pourrait permettre d'avoir une meilleure vue d'ensemble des principales problématiques liées à l'interaction entre le mannequin numérique et l'environnement dès les premières étapes de conception.

Enfin, l'intégration du facteur humain menée dans cette expérimentation au travers des outils de simulation déjà connus des acteurs-métiers en maintenabilité a permis la notation d'indicateurs courants en ergonomie tels que la posture, le temps ou encore la sécurité au travail. L'ensemble de ces indicateurs peut être évalué simplement, au travers des outils de simulation, puisque de nombreux outils simples existent et peuvent être utilisés par des non experts en facteur humain avec une formation simple (Rabardel et al., 2014). Nous pensons à la fiche APACT (Chitescu et al., 2003) ou encore l'outil RULA (McAtamney, 1993) qui se composent d'un algorithme à suivre étape par étape pour obtenir un score permettant de prévenir un potentiel risque de troubles musculo-squelettiques. L'usage de questionnaires normalisés comme l'échelle de Borg (Borg, 1982) pour recueillir le ressenti des opérateurs est une piste assez simple à mettre en œuvre par un non expert en facteur humain au travers des outils de simulation impliquant des opérateurs réels. Le cas de Borg est assez intéressant dans la mesure où son interprétation ne nécessite pas de formation spécifique, ce qui n'est pas le cas, par exemple, du questionnaire NASA-TLX pour évaluer la charge mentale (Hart & Staveland, 1988). Ce questionnaire impose des connaissances et une expérience dans la psychologie cognitive pour en extraire tout le potentiel ainsi que des résultats cohérents et interprétables. Egalement, comme expliqué plus haut, la préparation et l'anticipation des simulations seront des vecteurs clés pour assurer la justesse de l'analyse tout en fiabilisant la validité écologique du test. Il semble évident que le mannequin numérique reste un support intéressant mais limité par la seule analyse de certains critères physiques, ce qui n'est pas le cas de la réalité virtuelle et de la maquette physique qui elles, permettent l'étude de la composante organisationnelle et cognitive. Il est ainsi nécessaire de proposer aux acteurs-métiers en maintenabilité l'application d'un protocole structuré afin de les aider à mieux intégrer le facteur humain au travers des outils de simulation déjà connus et utilisés.

Ainsi, ces différentes analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse H3 : « Dans un contexte de maintenabilité (bureau d'études), les outils de simulation numériques et physiques peuvent se révéler pertinents, voire efficaces pour réaliser des analyses ergonomiques par des non experts en ergonomie ».

Les limites de notre étude peuvent apparaître en raison de la zone de travail sur laquelle nous avons concentré notre analyse : le plancher mécanique. En effet, travailler sur les autres parties de l'hélicoptère, telles que le rotor de queue à l'intérieur de la cabine ou dans le cockpit, pourrait donner des résultats différents entre les outils de simulation. Par exemple, la perception de l'opérateur pourrait être différente à l'intérieur de la cabine (où se trouvent les passagers), parce que le travail s'effectue dans un espace clos alors que notre étude est réalisée à une altitude de trois mètres au niveau des moteurs. Enfin, l'échantillon des opérateurs de maintenance, ayant participé à l'étude, était faible en raison de contraintes industrielles (planning des opérateurs). Il pourrait être intéressant de tester ces outils de simulation et les autres nouvelles technologies (réalité virtuelle augmentée et réalité mixte) avec une population nombreuse et dans plusieurs zones de travail autour de l'hélicoptère.

Globalement, nos résultats ouvrent un débat sur l'usage des outils de simulation qui peuvent influencer de manière significative l'intégration du facteur humain dans le processus de conception du département de maintenabilité. Nous proposons donc de développer une démarche qui sera dédiée aux non-experts en ergonomie afin de mieux utiliser les outils de simulation (numériques et physiques) pendant les analyses de maintenabilité, à des fins de mieux intégrer, avec les outils existants, le facteur humain dans ces analyses.

5. Synthèse de la discussion

Tableau 19 : Synthèse de la discussion.

Hypothèses	
<p>H3 : dans un contexte de maintenabilité (bureau d'études), les outils de simulation numériques et physiques peuvent se révéler pertinents, voire efficaces pour réaliser des analyses ergonomiques par des non experts en ergonomie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Tâche par tâche, notre étude a montré que la composante physique et cognitive n'a pas de différences significatives entre la réalité virtuelle et la maquette physique ; ➤ L'évaluation de la durée d'exécution, en revanche, qui est classée dans la dimension organisationnelle, présente des différences significatives ; ➤ L'amélioration de la plateforme de réalité virtuelle doit porter sur deux axes 1) l'intégration d'éléments physiques pertinents 2) l'amélioration de la qualité de l'affichage du graphisme numérique ; ➤ Les simulations sur la plateforme de réalité virtuelle doivent être mieux anticipées, notamment en termes de contacts potentiels entre l'opérateur et l'environnement ; ➤ Le mannequin numérique, ne faisant pas intervenir d'opérateur réel, permet uniquement d'évaluer la composante physique de l'ergonomie ; ➤ Des différences significatives sont établies entre le mannequin numérique et les deux autres outils de simulation pour les indicateurs de postures et de sécurité ; ➤ Les informations techniques des différents départements du bureau d'études vers la maintenabilité ne sont pas toujours transmises clairement, cela est dû aux itérations dans les premières phases du processus de conception ; ➤ Le paradigme existant pour réaliser des analyses de maintenabilité intégrant le facteur humain, à savoir l'analyse d'une tâche dans une zone de travail, ne semble pas valide pour le mannequin numérique ; ➤ Un nouveau paradigme est proposé pour étudier plusieurs tâches de maintenance pour une même zone de travail ; ➤ Les indicateurs ergonomiques évalués peuvent être adaptés aux non-experts en ergonomie à travers les outils de simulation ; ➤ En anticipant davantage les simulations associées à une méthodologie rigoureuse, il semble possible d'obtenir des résultats objectifs et fiables.

6. Synthèse et perspectives

Dans cette dernière partie, nous présentons la synthèse du chapitre ainsi que les perspectives permettant de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité au travers des outils de simulation.

6.1. Synthèse du chapitre

Au travers de ce deuxième chapitre et des différentes parties qui le composent, nous avons essayé d'observer l'apport des outils de simulation (le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique) à des fins d'analyses ergonomiques dans le département de la maintenabilité de notre industriel aéronautique pilote. Nous avons ainsi analysé les mêmes 11 tâches de maintenance au travers du mannequin numérique, de la réalité virtuelle et de la maquette physique. Les résultats des analyses ergonomiques obtenus au travers de chacun de ces outils de simulation, nous ont permis de les comparer afin de connaître leurs différences et leurs complémentarités. Ainsi, nos expérimentations ont montré que :

- Les outils de simulation faisant intervenir des opérateurs réels, la réalité virtuelle et la maquette physique, ne présentent pas de différences significatives lors d'analyses ergonomiques pour la majorité des indicateurs dédiés et sur l'ensemble des composantes physiques, cognitives et organisationnelles ;
- Le temps (un des indicateurs organisationnels) présente une différence significative due :
 - Au manque d'anticipation des interfaces tangibles,
 - Au manque de réalisme/qualité du monde virtuel observé à travers le casque de réalité virtuelle,
 - Au manque de connaissances et de formation des opérateurs réels sur l'outil de réalité virtuelle.
- Le mannequin numérique entraîne des différences significatives dans l'évaluation des indicateurs communs (avec la réalité virtuelle et la maquette physique) autour des composantes physiques et organisationnelles, notamment les indicateurs d'efforts/postures et de sécurité au travail ;
- Le mannequin numérique étant utilisé très tôt dans le processus de conception avec des itérations très courtes, la définition technique et le contexte d'usage ne sont pas finalisés ;
- Les informations techniques ne parviennent pas toujours à l'acteur-métier en maintenabilité réalisant l'analyse ergonomique au travers du mannequin numérique.

Le constat qui est fait au travers de nos observations nous amène à confirmer qu'il est possible d'étudier l'ensemble des composantes physiques, organisationnelles et cognitives pour la réalité virtuelle et la maquette physique. Le mannequin numérique, ne faisant pas intervenir d'opérateurs réels, se limite à l'étude de quelques indicateurs ergonomiques évaluant les composantes physiques et organisationnelles de l'ergonomie. Sous réserve d'améliorer les méthodologies mises en place au sein du bureau d'études pour fiabiliser et généraliser nos observations (Cf le chapitre suivant) nous pouvons valider l'hypothèse H3

6.2. Perspectives pour mieux favoriser l'intégration du facteur humain en maintenabilité

Ce deuxième chapitre nous a permis de comprendre que les analyses ergonomiques sont efficaces au travers des outils de simulation numériques et physiques. Cependant, l'étude de l'ensemble des composantes ergonomiques définies par l'IEA, 2000 (physiques, cognitives et organisationnelles) dépend de l'outil de simulation et du protocole d'usage qui lui est associé. Ainsi, afin d'améliorer la prise en compte du facteur humain, au travers des outils de simulation numériques et physiques, nous devons retenir que :

- Le **mannequin numérique** permet d'analyser la dimension physique (posture/effort) et organisationnelle (sécurité au travail) ;
- Le mannequin numérique est pertinent, si et seulement si, l'étude concerne plusieurs tâches dans une même zone de travail ; et non tâche par tâche comme la méthode actuelle.

- La **réalité virtuelle** permet d'analyser la dimension physique, cognitive et organisationnelle avec l'implication d'opérateurs réels ;
- La réalité virtuelle, pour évaluer le temps de réalisation d'une tâche, doit intégrer les contacts physiques pertinents, notamment au travers de systèmes tangibles ;
- L'environnement virtuel (visualisé au travers du casque) doit représenter l'ensemble du contexte de travail réel ;
- Les opérateurs doivent être formés et sensibilisés à cette technologie afin de réaliser des séquences de travail sans rajouter de biais liés à la découverte de la réalité virtuelle.

- La **maquette physique** permet d'analyser la dimension physique, cognitive et organisationnelle avec l'implication d'opérateurs réels ;
- La maquette physique doit être représentative en termes de dimensions mais aussi de formes, de masses ou encore de centres de gravité pour les pièces volumineuses à désassembler/assembler.

Ces recommandations doivent s'inscrire dans une démarche plus globale où l'acteur-métier en maintenabilité doit garder son autonomie et sa liberté d'action dans son travail. En d'autres termes, il doit pouvoir lui-même intégrer le facteur humain de manière plus pertinente que ce qu'il pouvait

faire jusqu'alors. En effet, le bureau d'études en maintenabilité doit garder la connaissance et la maîtrise technique tout en intégrant le facteur humain. Si les analyses ergonomiques étaient réalisées uniquement par des ergonomes et les analyses techniques uniquement par des acteurs-métiers en maintenabilité, le compromis entre exigences ergonomiques et critères mécaniques serait plus long à aboutir. Nous pouvons l'expliquer par la compréhension des problématiques techniques de la part de l'ergonome et la compréhension des problématiques ergonomiques de la part de l'acteur-métier en maintenabilité qui complexifieraient les processus collaboratifs actuels et augmenteraient considérablement les délais. Cette solution n'est pas viable, dans un environnement et un contexte où la compétitivité joue aussi sur une innovation qui se doit d'être rapide et efficace (Cardile, 2004). Il semble donc nécessaire, dans une première solution dédiée au département maintenabilité, d'apporter une démarche aux acteurs-métiers en maintenabilité. En effet, nous savons désormais, après l'analyse des résultats des chapitre 1 et 2, que l'acteur-métier en maintenabilité est d'une part, conscient des enjeux liés au facteur humain dans la conception de nouveaux produits et d'autre part, connaît les outils de simulation qui pourraient l'aider à mieux quantifier et étudier, par lui-même, le facteur humain à travers l'ergonomie. La suite de nos travaux va donc, naturellement, découler sur une proposition d'une démarche permettant, à tous les acteurs-métiers en maintenabilité, d'étudier et de quantifier par eux-mêmes les grands indicateurs ergonomiques autour des outils de simulation numériques et physiques disponibles et qu'ils exploitent dans leurs activités de tous les jours.

Ainsi, le chapitre III va détailler le développement de cette démarche associée que nous avons appelé PEAM (Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability).

*CHAPITRE III. PROPOSITION D'UNE
DEMARCHE D'INTEGRATION DU
FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE
AERONAUTIQUE*

Chapitre 3 : Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique

1. Introduction	140
2. Le modèle conceptuel	141
3. La démarche d’analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité (PEAM).....	146
3.1. <i>Déploiement de la démarche PEAM.....</i>	<i>146</i>
3.1.1. Objectif	146
3.1.2. Méthodes et techniques	146
3.1.3. Résultats et discussion	148
3.2. <i>Pré-sélection des outils de simulation</i>	<i>151</i>
3.2.1. Objectif	151
3.2.2. Méthodes et techniques	151
3.2.3. Résultats et discussion	155
3.3. <i>Choix de l’outil de simulation</i>	<i>157</i>
3.3.1. Objectif	157
3.3.2. Méthodes et techniques	157
3.3.3. Résultats et discussion	159
3.4. <i>Protocole d’usage des outils de simulation pour réaliser des études de facteur humain</i>	<i>161</i>
3.4.1. Objectif	161
3.4.2. Méthodes et techniques	161
3.4.3. Résultats et discussion	164
3.5. <i>Analyse du facteur humain</i>	<i>165</i>
3.5.1. Objectif	165
3.5.2. Méthodes et techniques	166
3.5.3. Résultats et discussion	172
3.6. <i>Discussion sur le processus général de la démarche PEAM</i>	<i>176</i>
4. Synthèse du chapitre et perspectives	181
4.1. <i>Synthèse du chapitre</i>	<i>181</i>
4.2. <i>Perspectives pour favoriser l’intégration du facteur humain en maintenabilité</i>	<i>182</i>

1. Introduction

Le premier chapitre nous a permis d’observer et de comprendre que les acteurs-métiers en maintenabilité, qu’ils soient ingénieurs ou techniciens, possèdent très peu de connaissances en facteur humain, mais qu’ils ont une réelle volonté de le prendre en compte, notamment à travers l’ergonomie, sa composante physique en particulier qui s’intéresse à l’anthropométrie, la biomécanique, les efforts, le port de charge et à l’environnement physique (bruit, chaleur, froid, lumière, vibrations). Par ailleurs, cette prise en compte du facteur humain au sein du processus de conception dédié à la maintenabilité reste très hétérogène, peu structurée, traduisant très certainement un manque de méthode, voire de méthodologie de la part des acteurs-métiers. Dès lors, ces derniers en maintenabilité tentent de s’appuyer sur des outils de simulation, qu’ils soient digitaux ou physiques, pour tenter d’anticiper, ou du moins comprendre, les activités futures probables, voire possibles des opérateurs de maintenance. Selon notre état de la littérature sur le sujet (De Sa et Zachmann, 1999 ; Gironimo et al., 2004 ; Broberg 2007 ; Regazzoni et Rizzi, 2014 ; Krüger et Nguyen, 2015), il semble ressortir que ces outils de simulation restent sous-exploités, voire mal exploités, pour réellement prendre en compte le facteur humain dans toutes ses dimensions au sein du processus de conception en maintenabilité. Pourtant, ces outils de simulation, bien connus et maîtrisés par les ingénieurs et techniciens pour des études de conception, permettent, selon de nombreux auteurs (Lorisson, 2010 ; Seth et al, 2011 ; Hashim et al., 2014 ; Nishanth et al., 2015), de conduire de vraies approches, de vraies analyses ergonomiques. Il semble également évident que tous ces outils, de par leurs caractéristiques et spécificités, peuvent permettre de supporter les analyses ergonomiques dans les phases de conception (Pontonnier et al 2014; Aromaa et al 2016). Les résultats du chapitre 1 nous ont ainsi montré que des outils de simulation existaient en maintenabilité mais qu’ils ne sont pas utilisés efficacement pour réaliser des analyses ergonomiques.

Notre second chapitre a, quant à lui, permis d’observer l’apport de chacun des trois outils de simulation (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique) pour réaliser des analyses ergonomiques en maintenabilité aéronautique. Plus particulièrement, nous avons d’une part observé que les indicateurs ergonomiques n’étaient pas tous évaluables à travers chacun des trois outils de simulation ; d’autre part, l’usage des outils de simulation à des fins d’analyses ergonomiques nécessite le déploiement d’un protocole rigoureux pour les utiliser efficacement. L’expérimentation de ce chapitre a eu pour objectif de comparer directement les résultats des analyses ergonomiques des trois outils de simulation montrant ainsi leur complémentarité, notamment au regard des phases composant le processus de conception.

Ainsi, pour résumer, au travers de nos observations et de nos constats issus des résultats des deux premiers chapitres, nous avons mis en évidence que le département de la maintenabilité de notre entreprise pilote, ne possédait que peu de connaissances en facteur humain. Egalement, chaque acteur-métier du département, conscient de l’utilité d’intégrer le facteur humain pour optimiser la conception des tâches de maintenance, essaie d’anticiper l’activité future de la maintenance au travers d’outils de simulation qu’il a l’habitude d’utiliser dans le cadre de ses activités. Cependant, seule l’ergonomie à travers sa composante physique est étudiée et encore que

partiellement, alors que les dimensions cognitives et organisationnelles sont également indispensables à toutes approches et analyses ergonomiques (Sagot et al., 2003).

Ainsi, notre troisième contribution est :

C3 : Sur la base des outils et moyens existants, développer une démarche favorisant l’intégration du facteur humain en maintenabilité pour des non experts en ergonomie.

Ainsi, en accord avec le groupe projet, toujours composé d’un expert en maintenabilité du département concerné, et de deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche, il a été décidé de développer une démarche afin d’accompagner l’acteur-métier en maintenabilité non spécialisé afin de mieux intégrer le facteur humain dans toutes ses dimensions à travers les outils de simulation existants. Précisons que cette démarche, à la demande de l’entreprise pilote, doit pouvoir s’inscrire dans le processus déjà existant, c’est-à-dire qu’elle ne doit pas changer les habitudes de travail actuelles mais agir comme un complément pour aider l’acteur-métier en maintenabilité à mieux quantifier et mieux prendre en compte les exigences ergonomiques. Cette logique vise à accroître l’acceptabilité de la démarche en ne changeant pas radicalement les habitudes acquises et maîtrisées dans le département maintenabilité. En effet selon Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009, il est important de se préoccuper d’abord de l’acceptabilité, c’est-à-dire comment la nouvelle démarche va être perçue et ainsi anticiper son appropriation par les acteurs-métiers pour assurer plus tard une acceptation totale de la nouvelle démarche dans les habitudes de travail.

Ce nouveau chapitre a donc pour objectif de proposer le développement d’une démarche pour guider les acteurs-métiers en maintenabilité à mieux prendre en compte le facteur humain dans le cadre de leurs activités de travail. Cette démarche, appelée d’un commun accord avec le groupe projet « Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability » (PEAM), en français « Analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité », doit ainsi permettre d’apporter une façon de faire pour mieux utiliser les outils de simulation à des fins d’analyses ergonomiques. Cette démarche fera l’objet d’un outil associé pour faciliter son utilisabilité au sein du service de maintenabilité. Elle n’a pas pour vocation de se substituer à un spécialiste en ergonomie mais bien d’aider l’acteur-métier en maintenabilité à mieux intégrer le facteur humain avec les outils de simulation qu’il exploite déjà.

2. Le modèle conceptuel

La maintenabilité a pour objectif de concevoir l’activité future de maintenance en développant la meilleure solution technique et / ou organisation du travail, en tenant compte du facteur humain à des fins de sécurité et de sauvegarde de la santé. Or, au regard des deux premiers chapitres, nous avons observé que les acteurs-métiers en maintenabilité n’avaient pas de connaissances en facteur humain et qu’ils n’exploitaient pas suffisamment les outils de simulation à des fins d’analyses ergonomiques. Pour les aider, en accord avec notre groupe projet, nous proposons ainsi de développer une démarche permettant aux acteurs-métiers du département maintenabilité de mieux intégrer le facteur humain dans leurs activités de travail de tous les jours, à partir des outils de

simulation (modeleur, mannequin numérique, réalité virtuelle, maquette physique) qu’ils utilisent aujourd’hui. Ainsi, l’objectif est de pouvoir les aider dans leurs pratiques de travail à des fins de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité.

Avant de proposer un modèle conceptuel, il convient de décrire la philosophie globale de notre démarche. Une nouvelle démarche doit donc s’insérer dans un processus déjà existant pour être utilisée rapidement, efficacement et par le plus grand nombre d’acteurs-métiers. Ainsi, cette approche, et cette volonté de se greffer au processus existant, doivent être vues comme une anticipation au rejet potentiel de tout acteur-métier envers de nouvelles méthodes qui viendraient modifier des habitudes acquises, maîtrisées et qui sont ancrées dans une routine de travail. On parle alors de la notion d’acceptabilité qui renvoie directement à la question de l’adoption ou du rejet d’une technologie, d’un processus ou encore d’une méthode en accord avec les travaux de Bobillier-Chaumon et Dubois, (2009). L’acceptabilité et les études associées permettent de mieux comprendre pourquoi un individu aurait envie d’utiliser un système plutôt qu’un autre mais également d’anticiper l’usage qu’il pourrait en faire (Terrade et al., 2009). Même si notre étude ne porte pas directement sur ces notions, il semble néanmoins important de les évoquer car elles nourrissent la réflexion autour de la construction de la démarche. La recherche conduite aux travers de ces travaux ayant une approche pragmatique dans un environnement industriel, le développement d’une démarche, que nous avons intitulée au sein du groupe projet, « PEAM » pour « Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability », en français « Analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité », comme déjà évoqué, est conçue et dédiée uniquement pour les acteurs-métiers en maintenabilité. Cette démarche ne doit pas seulement prendre en compte les outils de simulation et le processus de conception comme seuls leviers, mais doit aussi tenir compte des caractéristiques, des attentes et des besoins des acteurs-métiers ciblés pour qu’ils puissent utiliser la démarche proposée simplement et efficacement. Ainsi, il sera nécessaire de décrire précisément le processus d’usage de la nouvelle démarche afin qu’il soit exploitable en toute autonomie par chaque acteur-métier en maintenabilité non spécialisé en facteur humain. D’ailleurs, Barcenilla & Bastien (2009), évoque l’acceptabilité suivant deux notions, l’appropriation et l’intégration comme illustré sur la figure 41.

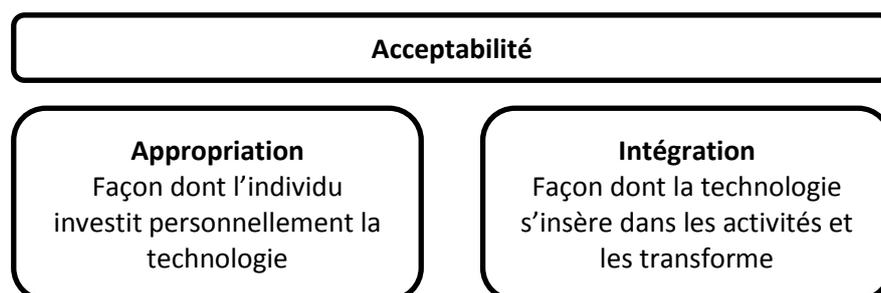


Figure 41 : Définition de l’acceptabilité retenue dans la thèse de Barcenilla & Bastien (2009).

Les auteurs expliquent ainsi que l’appropriation renvoie à la façon dont l’acteur-métier investit la démarche et dans quelle mesure celle-ci est en adéquation avec ses valeurs personnelles et culturelles, lui donnant envie d’agir sur ou bien avec celle-ci. L’intégration, quant à elle, correspond à

la manière dont la démarche s’insère dans les activités de l’utilisateur, et comment elle contribue à les transformer. Cette double prise en compte est essentielle puisque la démarche sera évaluée par la capacité à aider l’acteur-métier en maintenabilité à mieux intégrer le facteur humain dans le cadre de ses activités, à partir des outils de simulation mis actuellement à sa disposition. Si la démarche PEAM n’est pas conçue dès le début avec l’exigence d’acceptabilité, l’évaluation de son usage sera certainement impossible à l’échelle de l’ensemble des acteurs-métiers composant le département de maintenabilité.

Ainsi, comme nous l’avons décrit dans le chapitre I, l’analyse de la documentation technique fait ressortir une notation évaluant l’accessibilité, seul indicateur récurrent faisant appel à des notions de facteur humain. Dans le processus actuellement utilisé, le spécialiste en maintenabilité doit noter l’accessibilité suivant une graduation de quatre lettres: A, B, C et D. Le tableau 20 décrit les critères et la signification de chacune des lettres. Cette graduation se base sur des éléments subjectifs, rarement quantifiés et souvent basés sur la simple expérience de l’acteur-métier. Dans le but d’assurer l’appropriation de la démarche PEAM, nous proposons de garder cette graduation comme point de référence dans l’usage de PEAM. C’est-à-dire que l’acteur-métier commencera son analyse ergonomique en réalisant une première observation en estimant, par sa propre expérience, un score entre A et D. Il exécute ainsi le processus qu’il connaît et applique déjà. Il semble évidemment essentiel de respecter l’expertise de l’ingénieur et du technicien en considérant le score A comme une situation de travail non dangereuse pour l’opérateur et pour son environnement. En revanche, il faut l’accompagner, le guider, lorsque celui-ci estime que le score est au-dessus de A et donc que certaines contraintes existent sur l’opérateur pour réaliser la tâche de maintenance. Il est donc nécessaire de lui faire comprendre que si son jugement personnel le pousse à mettre un score entre B et D il est nécessaire d’approfondir l’analyse ergonomique. Par exemple, aujourd’hui, le score B indique que l’activité de maintenance est réalisable « sous certaines contraintes ». Aucune autre consigne ou questionnement ne lui est proposé et l’interprétation varie sensiblement entre chaque acteur-métier dépendant donc de leur propre expérience.

Tableau 20 : Notation utilisée en industrie aéronautique pour évaluer le facteur humain en maintenabilité pour effectuer une tâche de maintenance.

Symbole	Score	Design (Impact Hélicoptère)	Facteur humain (Impact opérateur)
	A	Design très satisfaisant pour la maintenabilité	Maintenance réalisable sans contrainte particulière
	B	Design satisfaisant mais des améliorations sont conseillées	Maintenance réalisable sous contraintes
	C	Amélioration de design fortement recommandée	Maintenance sous très fortes contraintes / impossibilité de faire la tâche

D Amélioration de design obligatoire

Afin de contextualiser la démarche PEAM, nous proposons un modèle conceptuel. Ce modèle s’appuie sur les travaux de la littérature dans le domaine proposant, pour chaque développement de méthodologie ou d’outil, un modèle théorique. Nous trouvons plus particulièrement des modèles permettant de réaliser des analyses ergonomiques ayant pour objectif de déterminer les causes d’apparition des troubles musculo-squelettiques (Carayon et al., 1999; Davis and Heaney, 2000; Karsh, 2006 ; David et al., 2008 ; Roquelaure, 2014). Le modèle conceptuel de la démarche PEAM a également fait l’objet d’une validation auprès de notre groupe projet, composé d’un spécialiste en maintenabilité du département de l’industriel aéronautique mais également de deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire. Plus particulièrement, le groupe projet a longuement discuté sur l’articulation entre la méthode actuelle déjà déployée dans le département et la démarche PEAM. Il a ainsi été décidé, d’un commun accord, que la démarche PEAM serait déployée uniquement :

- Lorsque l’acteur-métier juge la situation de travail de maintenance entre C et D. Un score entre C et D définit que la maintenance s’effectue sous de très fortes contraintes pour l’opérateur de maintenance nécessitant alors une amélioration de la situation de travail. La démarche PEAM, si elle est déployée, doit permettre d’argumenter sur l’origine des difficultés rencontrées par les opérateurs de maintenance ;
- Lorsque l’acteur-métier donne le score B, nous considérons qu’il y a ambiguïté dans le jugement. La notation actuelle adresse à la note B un descriptif ambigu, expliquant que la maintenance est réalisable avec certaines contraintes ergonomiques. Nous proposons alors de réaliser une analyse ergonomique préliminaire lui permettant rapidement de se positionner : soit en A, induisant une poursuite de l’analyse de maintenabilité, soit en C ou en D, induisant le déploiement total de PEAM. La suite de la démarche permet alors de choisir les bons outils de simulation en fonction du processus de conception ainsi que les indicateurs ergonomiques. La quantification des indicateurs permet d’obtenir un score global entre A et D. L’acteur-métier retrouve donc le score avec lequel il est familier et peut ainsi le justifier grâce au protocole déployé et aux scores de chaque indicateur en facteur humain de PEAM.

La figure 42 présente le modèle conceptuel retenu et validé par le groupe de travail, celui-là même qui a œuvré sur le sujet durant 6 semaines. La démarche tient compte du processus actuel en adressant des recommandations en fonction du score d’analyse connu (A, B, C ou D).

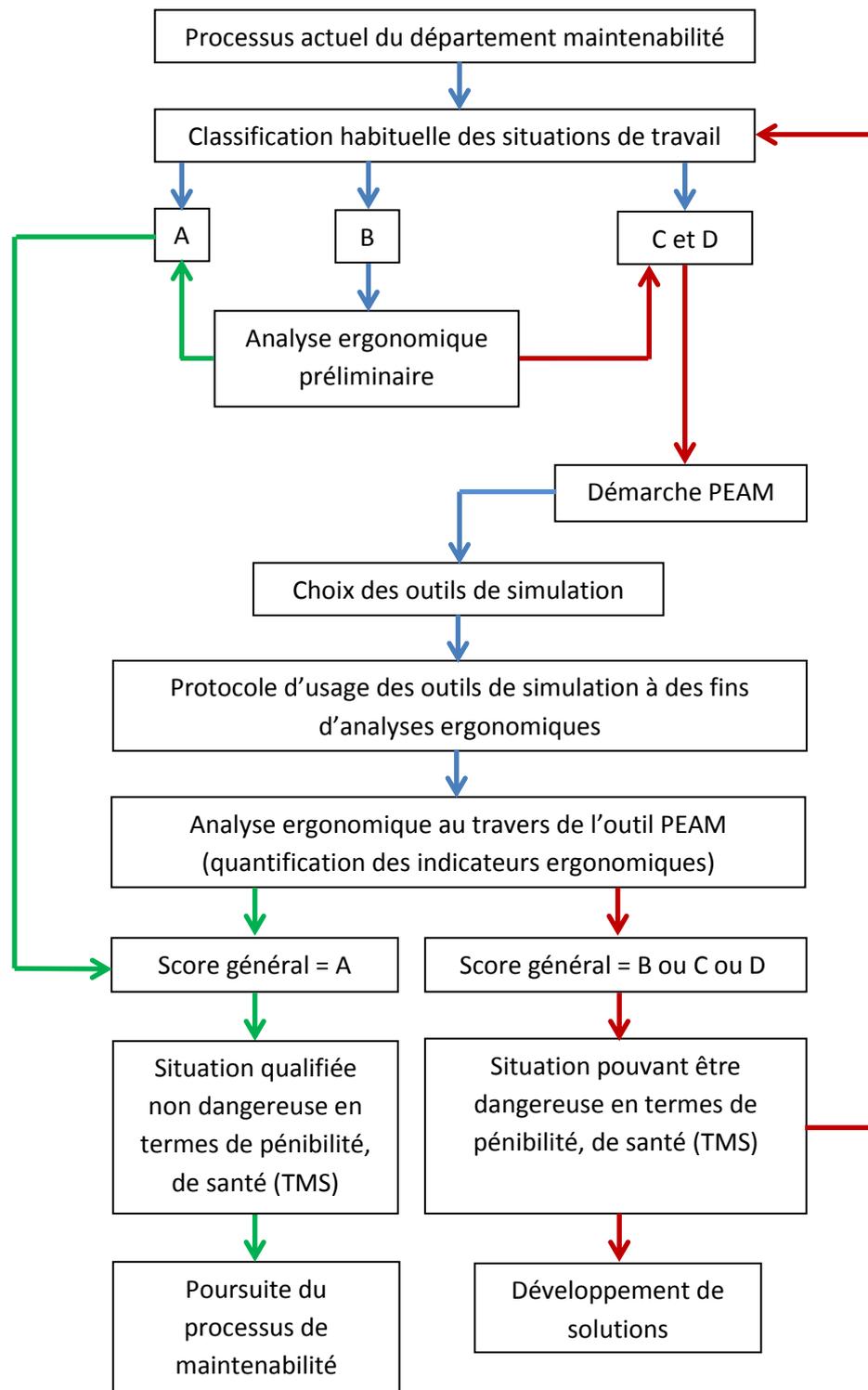


Figure 42 : Modèle conceptuel de la démarche d’analyse ergonomique PEAM.

La suite du chapitre va développer et décrire la démarche PEAM étape par étape. Nous verrons également en dernier lieu, sa forme finale qui sera diffusée, après avoir été testée et validée par le groupe projet, et tous les acteurs-métiers en maintenabilité. Elle doit apporter les informations essentielles pour un usage efficace et efficient de la dite démarche.

3. La démarche d’analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité (PEAM)

Cette partie vise à détailler, étape par étape, la démarche PEAM. Nous décrivons ainsi, les objectifs et les méthodes déployées pour construire chacune d’elle avant d’observer le processus associé.

3.1. Déploiement de la démarche PEAM

3.1.1. Objectif

Afin d’assurer une bonne acceptabilité de la démarche PEAM, nous avons décidé, avec le groupe projet, d’associer la démarche PEAM au processus existant et plus particulièrement à celui de l’analyse d’accessibilité. L’objectif de cette partie est donc de déterminer, comment, à partir d’un processus existant, un acteur-métier en maintenabilité peut choisir d’utiliser, ou non, la démarche PEAM.

3.1.2. Méthodes et techniques

Pour associer le processus existant à la démarche PEAM, nous avons réalisé une concertation avec le groupe projet, composé, comme déjà évoqué, d’un expert en maintenabilité du département concerné, et de deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche. Chaque concertation s’est déroulée sous forme de réunion avec l’ensemble des acteurs-métiers composant le groupe projet. Il y a eu trois réunions de deux heures qui ont permis à chacun de faire des propositions verbales et d’aboutir à un compromis. Ainsi, cette concertation a permis de déterminer les critères déclenchant de la mise en œuvre de la démarche PEAM. Nous restituons dans les paragraphes qui suivent l’orientation définie pour provoquer ou non la démarche PEAM.

En partant de l’analyse de maintenabilité déjà déployée et utilisée depuis de nombreuses années au sein du département maintenabilité de l’industriel aéronautique partenaire de cette recherche, l’acteur-métier en maintenabilité arrive naturellement à « l’analyse d’accessibilité » avec la notation déjà connue et utilisée, expliquée dans le tableau 20. Cette étape, dans le processus de maintenabilité actuel, est la seule où l’analyse ergonomique a lieu. Cette étape est donc clé car elle

guide l’ingénieur et le technicien en maintenabilité vers l’utilisation ou non de la démarche PEAM en accord avec le groupe projet. Ainsi, trois possibilités ont été identifiées sur la base des scores initialement connus par les acteurs-métiers en maintenabilité :

1. **Noté A** : l’acteur-métier évalue par expérience la situation de travail, quel que soit l’outil de simulation utilisé (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique), et considère que l’opérateur de maintenance n’aura aucune difficulté, d’un point de vue physique, pour réaliser la tâche de maintenance. Dans ce cas, nous avons considéré en groupe projet et sur la base des retours des verbalisations que l’acteur-métier en maintenabilité peut continuer dans le processus actuel sans approfondissement de la notion de l’ergonomie en termes de prise en compte du facteur humain.
2. **Noté B** : l’acteur-métier considère que l’opérateur fera la tâche sous certaines contraintes mineures en termes de pénibilité, de risque de TMS,.... Afin de réduire la subjectivité de cette évaluation conduite actuellement par les acteurs-métiers, il devra prendre en compte les principaux indicateurs introduits dans le tableau 21. Ces cinq indicateurs sont les plus connus par les acteurs-métiers et les plus couramment utilisés en accord avec les retours de nos réunions conduites avec le groupe projet.

Tableau 21 : Indicateurs principaux et leurs définitions associées pour réaliser une analyse préliminaire d’accessibilité. Ces indicateurs sont les plus utilisés dans la littérature scientifique de la maintenabilité pour étudier des tâches de maintenance.

Indicateurs	Définition
Accessibilité physique	Capacité à accéder sur la zone de la tâche de maintenance
Accessibilité visuelle	Capacité à accéder sur la zone de la tâche de maintenance
Assemblage	Capacité à réaliser l’assemblage dans un espace contraint
Désassemblage	Capacité à réaliser le désassemblage dans un espace contraint
Risques de blessure	Risques potentiels pour l’opérateur (chute, coupure etc.)

Pour évaluer ces indicateurs, nous avons proposé un système de notation simple basé sur l’échelle de Likert (Allen & Seaman, 2007). Cette échelle permet de noter rapidement la satisfaction par rapport à une affirmation. Par exemple, dans le tableau 22, nous affirmons que l’accessibilité physique est excellente. L’acteur-métier en maintenabilité doit alors juger s’il est tout à fait d’accord avec cette affirmation, correspondant à 1, ou pas du tout d’accord. Egalement, en accord avec le groupe projet, nous décidons de considérer que si tous les indicateurs présentent un score **strictement inférieur à 3**, alors nous pouvons considérer la situation de travail avec un score A. En revanche, si et seulement si, un des indicateurs présente un **score supérieur ou égal à 3**, il est nécessaire d’effectuer une analyse avec le mannequin numérique. Le choix du mannequin numérique, qui a fait l’objet de nombreux échanges au sein du groupe projet, mais qui a bien été validé par ce dernier, est justifié par sa rapidité de mise en place et sa pertinence pour évaluer les cinq indicateurs du tableau 22. De plus, sur la base des retours que nous avons pu avoir lors de nos trois réunions avec le groupe projet, le mannequin numérique est accessible par tous les acteurs-métiers et sur chaque ordinateur du bureau d’études. Cet outil de simulation doit être utilisé suivant le protocole détaillé dans la partie 3.4 (les prérequis communs à chaque outil de simulation). Nous analysons ainsi trois mannequins de tailles différentes (5^{ième} féminin, 50^{ième} homme et 95^{ième} homme

européens) comme le précise la norme ISO 15537 intitulée « Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception. Les dimensions anthropométriques de chaque opérateur pouvant induire des postures bien différentes pour une même situation de travail, plus particulièrement lorsque la situation de travail étudiée est exécutée dans un environnement très contraint comme c’est le cas sur un hélicoptère.

Tableau 22 : Indicateurs principaux et systèmes de notation pour réaliser une analyse préliminaire d’accessibilité. Si un des indicateurs à un score supérieur ou égal à 3, PEAM doit être utilisée.

	Evaluation
Affirmation des indicateurs ergonomiques	1=Tout à fait d’accord ; 2=D’accord ; 3=Ni d’accord, ni pas d’accord ; 4=Pas d’accord 5=Pas du tout d’accord
L’ accessibilité physique est excellente	1 2 3 4 5
L’ accessibilité visuelle est excellente	1 2 3 4 5
L’ assemblage se fait très facilement	1 2 3 4 5
Le désassemblage se fait très facilement	1 2 3 4 5
Les risques de blessure sont inexistants	1 2 3 4 5

Si, à travers le mannequin numérique, l’analyse préliminaire confirme au moins un score supérieur ou égal à 3, alors la notation de la situation de travail sera classée en C/D induisant la nécessité de déployer la démarche PEAM. En effet, lors des trois réunions avec le groupe projet, et les retours qui en ont découlé, il est ressorti que si un des cinq indicateurs pouvait mettre en avant une difficulté pour réaliser la tâche, il est nécessaire d’investiguer davantage la tâche de maintenance étudiée pour assurer la sécurité et la santé de l’opérateur mais également de l’hélicoptère.

- Noté C ou D** : L’acteur-métier en maintenabilité considère que l’opérateur fera la tâche mais dans des conditions contraignantes en termes de pénibilité, de gestes, d’efforts, de ports de charges,... engageant dès lors un risque avéré pour l’opérateur d’une part mais aussi pour l’hélicoptère. Ce score induit l’usage systématique de la démarche PEAM. Ce choix découle une fois encore, des retours du groupe projet qui ont mis en avant qu’entre le score C et D le risque pour l’opérateur ou pour l’hélicoptère pouvait être important et réellement pénalisant, voire dangereux.

3.1.3. Résultats et discussion

La première partie de la démarche PEAM vise donc à créer une synergie entre le processus actuellement utilisé par les acteurs-métiers en maintenabilité du département maintenabilité de l’industriel aéronautique, et la démarche elle-même. Cette volonté de partir de l’existant vise à accroître l’acceptabilité d’une nouvelle démarche par l’ensemble des acteurs-métiers du bureau d’études maintenabilité (Barcenilla & Bastien, 2009). Ainsi, en accord avec le groupe projet, et des échanges qui ont découlé des réunions dédiées à la construction de cette première étape, nous

avons ainsi décidé de partir des scores actuellement connus et utilisés qui permettent aux ingénieurs et techniciens de la maintenabilité d’évaluer l’accessibilité. Accessibilité que nous pouvons définir en accord avec les travaux de Moreu De Leon et al. (2012) comme la capacité à accéder à une zone de travail et à réaliser une activité de travail dans des conditions de sécurité et de santé optimale pour l’opérateur. Nous avons ainsi défini, avec le groupe projet, la signification de chacun des scores actuellement utilisé (noté A, B, C et D) et y avons associé un processus permettant la prise de décisions quant au déploiement de la démarche PEAM. Ce processus (Figure 43) détaille les étapes à réaliser pour que l’acteur-métier ait un point de repère dans les notations actuellement connues. Ainsi, la démarche PEAM, dans sa philosophie, s’appuie sur des approches déjà exploitées dans la littérature scientifique en facteur humain, qui permettent de sélectionner, par exemple, les variables anthropométriques les plus adaptées en fonction de l’activité de l’opérateur (Molenbroek et al., 2005; 2006 ; Bertilsson, 2010). Les travaux de Ranger et al., 2017 qui proposent une cartographie de l’activité de dimensionnement chez les designers industriels, qui tient compte des classes de produits et des deux axes virtuels et réels, ont également présenté un modèle pour guider les concepteurs à mieux intégrer certains aspects du facteur humain. D’ailleurs, sur cette base, et en accord avec le groupe projet, nous détaillons à chaque étape de la démarche PEAM qui suivra dans ce chapitre, le processus associé.

Pour résumer, il convient de retenir, dans ce qui vient d’être montré, que l’étape 1 correspondant au point de départ dans l’analyse de maintenabilité qui découle sur l’étape 2, l’analyse de l’accessibilité, déjà connue et utilisée par les acteurs-métiers en maintenabilité avec la notation A, B, C ou D de la situation de travail. Afin de ne pas contraindre l’acteur-métier et lui laisser une latitude décisionnelle, nous considérons à l’étape 3, que si la situation est jugée avec un score A, alors il n’est pas nécessaire de déployer PEAM. L’étape 5 correspond à la notation de la situation de travail pour un score B. Afin d’enlever toute ambiguïté sur la situation de travail, une analyse préliminaire doit être conduite une première fois en étape 7’ puis, si nécessaire, une deuxième fois au travers du mannequin numérique correspondant ainsi aux étapes 12’, 13’ et 9’. Cette analyse permet de faire un choix entre un score A ou C. Si le score évalué est A alors l’acteur-métier poursuit son analyse de maintenabilité (étape 4). Si le score est évalué à C, alors il doit réaliser totalement la démarche PEAM. Le score D indique un usage systématique de la démarche PEAM.

Lorsque cette première partie de la démarche PEAM est réalisée, l’acteur-métier a deux possibilités : continuer son analyse de maintenabilité si le score d’accessibilité est A ; ou aller plus loin dans la démarche PEAM, à savoir réaliser une étude de facteur humain, si le score s’est révélé être C ou D. La suite de ce chapitre détaille la deuxième partie de la démarche PEAM : le choix de l’outil de simulation.

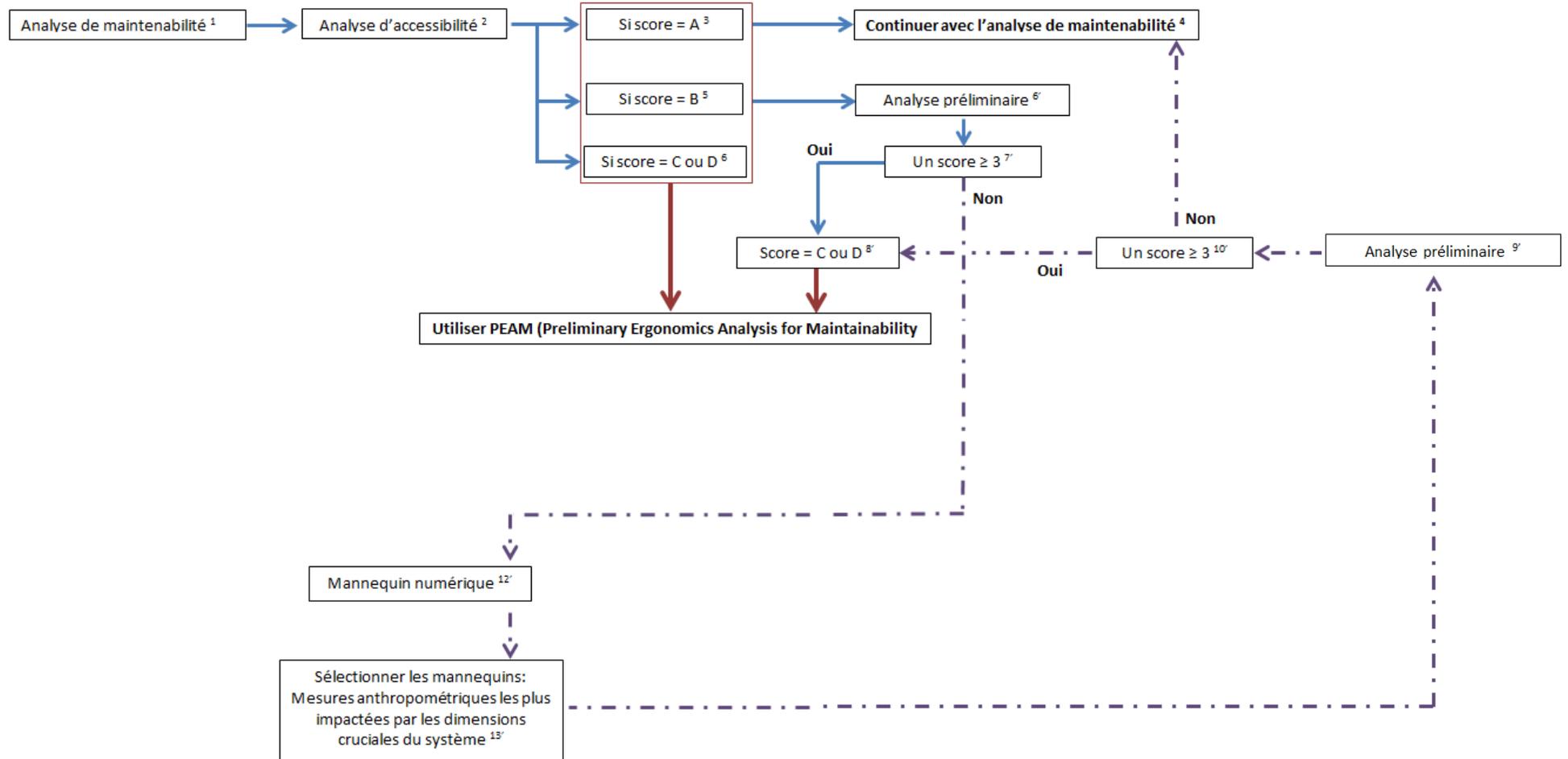


Figure 43 : Processus détaillant la première grande étape de la démarche PEAM: passer du processus existant en maintenabilité vers la démarche PEAM.

3.2. Pré-sélection des outils de simulation

3.2.1. Objectif

Dans cette partie, nous détaillons la première étape que doit réaliser l’acteur-métier en maintenabilité lorsque le score de l’analyse d’accessibilité est considéré entre C et D. Cette première étape a pour objectif de déterminer les outils de simulation les plus adaptés pour réaliser une étude de facteur humain.

3.2.2. Méthodes et techniques

Toujours avec l’appui et la concertation du groupe projet, nous avons cette fois-ci réalisé deux nouvelles réunions de deux heures afin de déterminer les outils de simulation les plus adaptés pour supporter l’intégration du facteur humain qui sera réalisée par les acteurs-métiers dans le département maintenabilité. L’échange entre les acteurs-métiers, et plus particulièrement des experts en maintenabilité connaissant parfaitement le processus actuel, ses contraintes, ses limites mais aussi ses avantages, a permis de dégager les étapes nécessaires à la sélection des outils de simulation.

Les deux concertations avec le groupe projet traduisent que l’outil de simulation choisi dépend de plusieurs étapes que nous proposons de détailler ci-dessous. La première étape permet de présélectionner un ou deux outils selon deux approches simultanées:

- **La zone de travail** sur laquelle l’opérateur réalise la tâche de maintenance. Ce découpage a été réalisé en interne, avec les acteurs-métiers en maintenabilité et les experts de la structure hélicoptère. Il a été décidé, au regard de l’indicateur d’accessibilité existant au sein de l’industriel aéronautique, de le diviser en deux : l’accessibilité interne et externe. Ce découpage définit donc une tâche de maintenance réalisée depuis l’intérieur de l’hélicoptère (le cockpit, la cabine etc) et une tâche de maintenance réalisée depuis l’extérieur (une trappe dans le fuselage, le radome etc). Ce choix de découpage étant sensible, voire confidentiel, nous ne pouvons pas donner les détails pouvant le justifier. Il est néanmoins important de préciser que ce découpage couvre l’ensemble des accès pour réaliser la maintenance d’un l’hélicoptère. Un hélicoptère est un système complexe dont la maintenance peut s’effectuer aussi bien de l’intérieur que de l’extérieur. Nous proposons ainsi un premier découpage entre l’accessibilité externe et l’accessibilité interne. Ce découpage a été choisi par le département où l’étude de maintenabilité est effectuée, il est représentatif des grandes zones déjà étudiées aujourd’hui. Les figures 44 et 45 ainsi que le tableau 23 détaillent ce découpage tout en respectant les règles de confidentialité liées à notre travail de recherche.

Tableau 23 : Nom de chaque zone de l’hélicoptère par laquelle la maintenance peut s’effectuer par l’extérieur et l’intérieur.

	Points de repère	Nom
Accessibilité extérieure	A	Radome
	B	Fuselage
	C	Poutre de queue
	D	Rotor anti-couple
	E	Sous-barque
	F	Plancher mécanique
Accessibilité intérieure	A	Cockpit
	B	Cabine
	C	Fuselage intermédiaire
	D	Plancher mécanique
	E	Poutre de queue

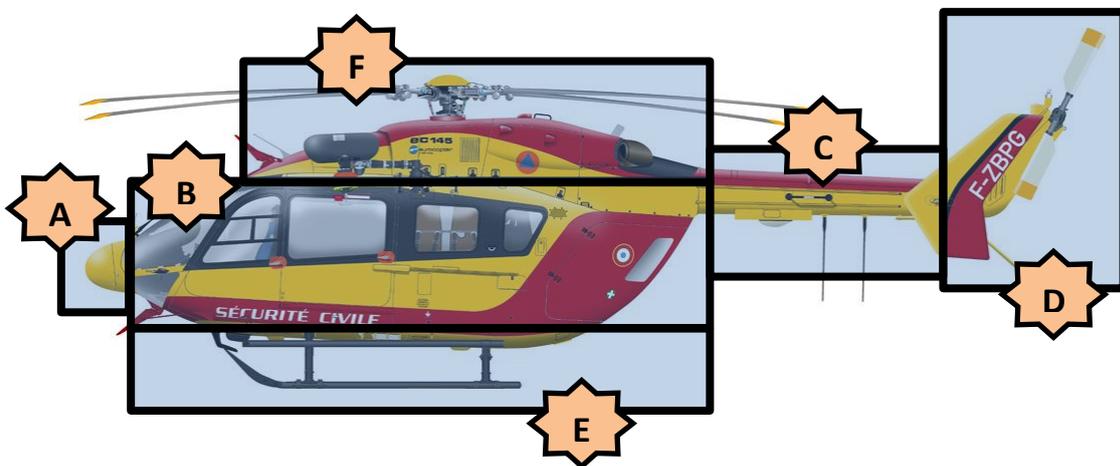


Figure 44 : Découpage extérieur retenu d’un hélicoptère, en zones principales où la maintenance est effectuée.

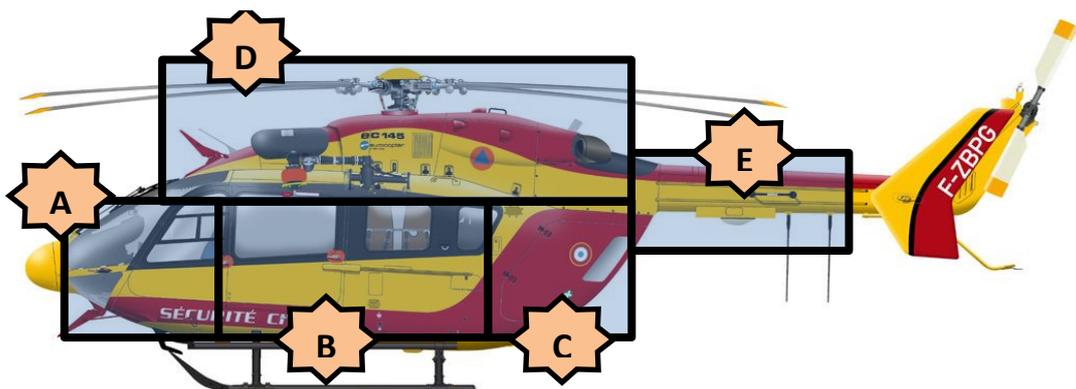


Figure 45 : Découpage intérieur d’un hélicoptère, divisé en zones principales où la maintenance est effectuée.

- **La phase d’étude** du processus de conception dans laquelle s’inscrit l’analyse ergonomique : la littérature scientifique, depuis les années 1990, place l’ergonomie comme un élément clé de la conception anthropocentrée qui doit par conséquent s’adapter tout au long du processus, aux outils et aux connaissances des personnes travaillant en bureaux d’études (Quarante, 1994 ; Fadier, 1997 ; Falzon ; 1998 ; Sagot et al., 2003). Afin d’améliorer les analyses ergonomiques et les collaborations multi-métiers à travers les outils de simulation, il existe des modèles théoriques s’appuyant sur ces outils de simulation comme support commun aux ergonomes et aux concepteurs. Le modèle présenté en figure 46 issu des travaux conduits au sein de notre équipe de recherche (Chitescu et al., 2003) introduit la notion d’usage d’outils de simulation en fonction de l’étape du processus de conception. Ce modèle reprend ainsi les phases générales que l’on retrouve classiquement dans les modèles de conception déployés en bureau d’études (étude de faisabilité, étude préliminaire, étude détaillée, réalisation/fabrication et déploiement sur le terrain). Le modèle théorique propose d’associer un outil de simulation à chaque phase du processus, en cohérence avec les propriétés de chacun des outils. Ainsi, dans la littérature, la simulation numérique à travers par exemple le mannequin numérique, est souvent rattachée à la phase 1. Les études de Perez & al., 2014 ; Kruger – Nguyen, 2015, montrent l’utilité du mannequin numérique au début du processus de conception là où les itérations sont très fortes et les données techniques changeantes. Le mannequin numérique est très facile et rapide à mettre en œuvre et s’adapte très bien à cette première phase. La phase 2 est, quant à elle, plus associée à la réalité virtuelle. Le niveau de détails techniques de la maquette numérique devient plus élevé et le besoin de collaboration devient fort (Gherbi et al., 2006 ; Sherman, & Will, 2009; Lorisson, 2010). La phase 3 correspond à l’étude détaillée avant que la définition finale du produit ne soit validée. La maquette physique est alors déployée, appelée ici simulation réaliste (Bayramzadeh et al., 2018).

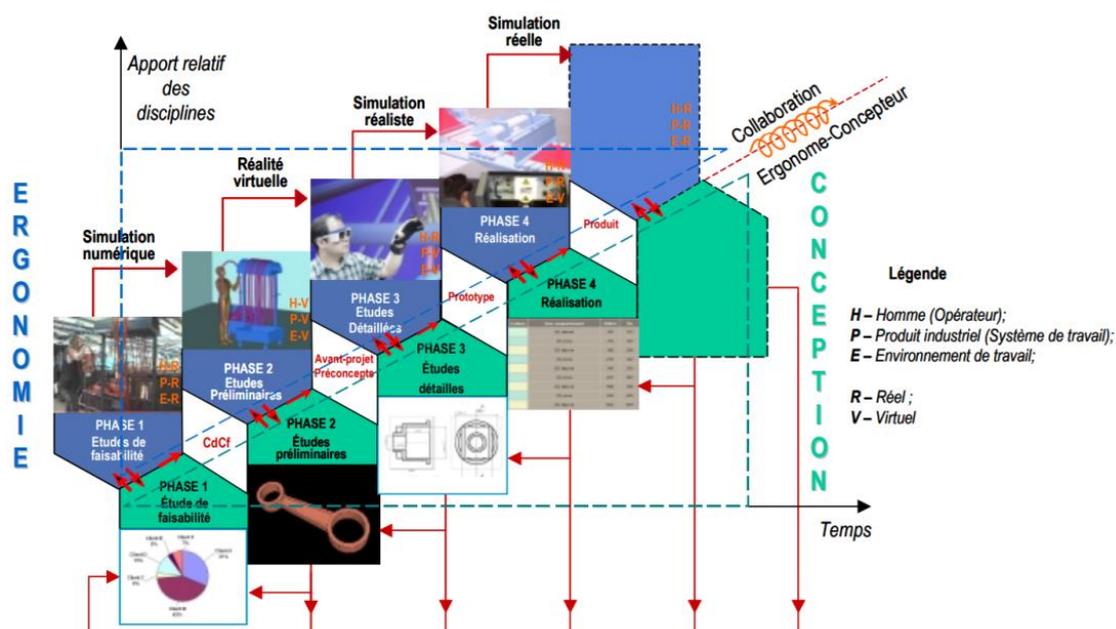


Figure 46 : Méthodologie de conception centrée sur l’Homme, extrait du modèle proposé par Chitescu et al., 2003, sur la base de ses travaux conduits au sein de notre équipe de recherche (ERCOS du Laboratoire ELLIADD).

Ce modèle est très proche de celui de la maintenabilité, seule la phase 3 (analyse de maintenabilité) de notre modèle (figure 47) s’insère entre les phases 2 et 3 du modèle théorique (figure 46). A la suite de nos constats, observations et résultats issus des chapitres 1 et 2, et en accord avec les différents acteurs-métiers du département maintenabilité, nous insérons dans notre outil la possibilité d’utiliser le modèle numérique seul (modeleur) sans y intégrer de mannequin numérique. Ce choix a été fait pour les phases très préliminaires, lors des premières esquisses d’une architecture produit, pour assurer le dimensionnement d’espaces, de volumes comme les trappes d’accès, en accord uniquement avec des normes telles que la MIL STD 1472 appelée « Design criteria human engineering ». En effet, sur la base des échanges que nous avons pu avoir au cours de nos concertations avec le groupe projet, la norme MIL STD 1472 est déjà déployée et utilisée au sein même du département maintenabilité. Sans intégration d’un mannequin numérique donnant un cadre à l’intégration du facteur humain, l’usage de la norme MIL STD 1472 associée au modèle 3D, reste une solution d’analyse acceptable pour les toutes premières étapes du processus de conception. Ainsi, il convient de se repérer dans le processus de conception en maintenabilité de notre industriel aéronautique que nous découpons en 5 grandes zones/phases en accord avec le groupe projet (figure 46). Chaque zone correspond à un niveau de maturité de la maquette numérique et de la maquette physique permettant de réaliser une analyse ergonomique. Arbitrairement, le niveau de maturité des maquettes numériques et physiques est considéré comme pertinent lorsqu’elles peuvent être utilisées sans apport de modification. Par exemple, pour la maquette physique, en phase préliminaire (Zone 1 et 2 de la figure 47), le niveau de détails est relativement faible, ne faisant apparaître que les formes globales afin d’étudier le design et non l’approche ergonomique nécessaire à la conception d’une future tâche de maintenance en maintenabilité. Il faudrait ainsi ajouter des éléments physiques supplémentaires pour reproduire des formes et des masses réalistes afin de réaliser une analyse ergonomique pertinente.

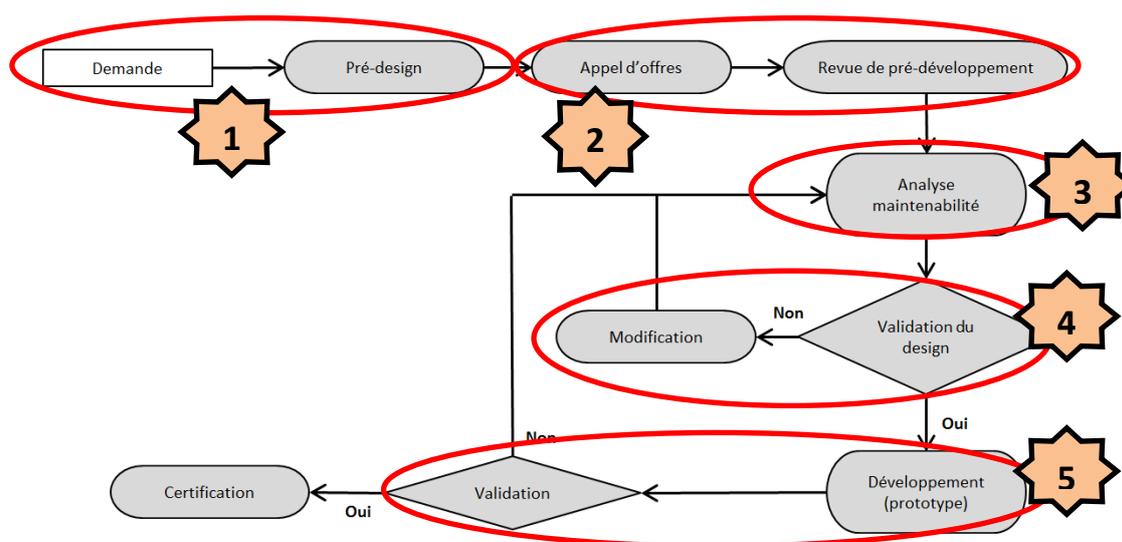


Figure 47 : Zonage du processus de conception réalisé dans le cadre du développement de l’outil PEAM établi avec le groupe projet en fonction du niveau de maturité des maquettes numériques et physiques.

3.2.3. Résultats et discussion

Nous avons pu développer avec le groupe projet, et sur la base de nos analyses conduites en particulier sur des documents techniques, deux tableaux croisés, l’un en accord avec l’accessibilité extérieure (tableau 24) et l’autre avec l’accessibilité intérieure (tableau 25). Pour comprendre la lecture des deux tableaux, le tableau 6 présente un exemple et explique le cheminement entre l’analyse sur le fuselage et l’étape 4 du processus de conception. On voit qu’une possibilité entre deux outils de simulation, mannequin numérique (MN) et maquette physique (MP), est possible. En effet, pour le fuselage, il s’agit très souvent de définir l’emplacement des marchepieds et des poignées afin d’assurer le déplacement de l’opérateur entre le sol et le moteur (partie haute de l’hélicoptère, le plancher mécanique). A l’étape 4 du processus de conception, la maquette numérique est suffisamment détaillée pour passer sur la réalité virtuelle, or, ici, simuler l’activité est impossible. Simuler le déplacement vertical en réalité virtuelle nécessiterait des moyens trop coûteux et longs à mettre place, notamment des éléments physiques qui se rapprocheraient du niveau de détails de ceux construits pour la maquette physique. C’est pourquoi, le choix a été de privilégier deux autres outils de simulation que sont le mannequin numérique 3D paramétrable et la maquette physique.

Tableau 24 : Outils de simulation choisis en fonction de la zone d’accès extérieur et de l’étape du processus de conception. (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).

Accessibilité extérieure								
Phase du processus	Outils de simulation	Radome	Fuselage (Marchepieds/poignées)	Fuselage (Trappe)	Poutre de queue	Rotor anti-couple	Sous-barque	Plancher mécanique
1	M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	MN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RV							
	MP							
2	M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	MN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RV	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	MP							
3	M							
	MN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RV	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	MP		✓					
4	M							
	MN	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	RV	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	MP		✓					
5	M							
	MN							
	RV	✓		✓	✓	✓	✓	✓
	MP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Chapitre 3 – Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique

Tableau 25 : Outils de simulation choisis en fonction de la zone d’accès intérieur et de l’étape du processus de conception (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).

Accessibilité intérieure						
Phase du processus	Outils de simulation	Cockpit	Cabine	Fuselage intermédiaire	Plancher mécanique	Poutre de queue
1	M	✓	✓	✓	✓	✓
	MN	✓	✓	✓	✓	✓
	RV					
	MP					
2 - 3	M					
	MN	✓	✓	✓	✓	✓
	RV	✓	✓	✓	✓	✓
	MP					
4	M					
	MN					
	RV	✓	✓	✓	✓	✓
	MP					
5	M					
	MN					
	RV	✓	✓	✓	✓	✓
	MP	✓	✓	✓	✓	✓

Concernant l’accessibilité intérieure, les déplacements sont plus petits puisque le travail s’effectue dans un espace très contraint en termes de volume comme dans la poutre de queue illustrée en figure 48. C’est pourquoi les zones 2 et 3 du processus de conception ont été regroupées en accord avec le groupe projet, puisqu’elles offrent une définition équivalente.



Figure 48 : Maintenance effectuée dans la poutre de queue d’un hélicoptère.

Cette étape permet aux acteurs-métiers en maintenabilité de présélectionner des outils de simulation en fonction de la phase du processus de conception mais également de la zone de travail sur l’hélicoptère. Cette pré-sélection permet de faire ressortir les outils de simulation les plus adaptés pour réaliser des analyses en facteur humain. Les deux tableaux croisés, permettant de présélectionner les outils de simulation, ont été discutés et validés avec le groupe de travail qui a trouvé le format clair, intuitif et surtout rapide d’usage. Ce format de lecture, rapide et efficient, est bien ancré dans la philosophie de la démarche PEAM pour accroître l’acceptabilité de la démarche au sein du département maintenabilité.

3.3. Choix de l’outil de simulation

3.3.1. Objectif

La convergence entre les phases du processus et les zones de travail sur l’hélicoptère nous amène à sélectionner un ou deux outils de simulation. Par exemple, la phase 2 regroupant les appels d’offres et la revue de pré-développement, peut nous amener à faire un choix entre le mannequin numérique (souvent utilisé lors des appels d’offres) et la réalité virtuelle (souvent utilisée en revue de pré-développement). Or, pour être efficace, le groupe projet souhaite qu’une analyse en facteur humain appelle l’usage d’un seul et même outil de simulation afin d’éviter des itérations longues en termes de temps qui peuvent introduire de l’ambiguïté dans les recommandations associées. Ainsi, l’objectif de cette étape, à la demande de notre entreprise pilote pour que notre démarche puisse être réellement opérationnelle, est de finaliser le choix d’un seul outil, sur la base de la pré-sélection réalisée en étape 2.

3.3.2. Méthodes et techniques

En accord avec le groupe projet, nous proposons de faire la sélection d’un seul outil de simulation en fonction des indicateurs ergonomiques que souhaite observer l’acteur-métier en maintenabilité. En effet, comme l’a montré le chapitre 2, les outils de simulation sont complémentaires entre eux et ne permettent pas d’étudier tous les indicateurs. Plus particulièrement, cette expérimentation a eu pour but d’étudier précisément six indicateurs (postures, symptômes de troubles musculo-squelettiques, efforts, sécurité aire de travail, temps et charge mentale). Ces indicateurs ont été étudiés par des spécialistes en ergonomie avec des outils spécifiques et propres à leurs expertises. Pour s’assurer que le taux d’acceptabilité de notre démarche soit élevé, il convient d’adapter l’étude de ces indicateurs pour des non experts en facteur humain. Ainsi, au travers d’une concertation concrétisée par deux réunions de deux heures, avec les acteurs-métiers du bureau d’études, un ergonome d’un autre département (équipement de bord) et un ergonome de l’équipe de recherche du laboratoire partenaire de cette recherche (Pôle de recherche ERCOS, laboratoire ELLIADD E.A 4661), nous avons sélectionné sept indicateurs essentiels dans l’activité de maintenance. Ces indicateurs ont été sélectionnés parmi ceux évoqués dans le chapitre 1, c’est-à-dire des indicateurs

que l’on retrouve régulièrement dans la littérature scientifique définissant la maintenance et la maintenabilité, et ceux observés ou analysés en chapitre 2, qui permettent d’étudier les composantes physiques, cognitives et organisationnelles de l’ergonomie (IEA, 2000). L’ensemble des indicateurs du chapitre 2 ont donc été sélectionnés par le groupe projet. Ces indicateurs se révèlent en effet pertinents pour analyser l’activité de maintenance et évaluables par des non experts en facteur humain. Egalement, nous avons rajouté un septième indicateur permettant d’évaluer les collisions entre l’individu et l’environnement. Cet indicateur a été jugé comme très pertinent pour convaincre les autres départements lors des réunions collaboratives. En effet, les collisions avec l’environnement impactent l’ensemble de l’architecture et des systèmes se trouvant dans la zone de travail de l’opérateur de maintenance. Cet indicateur donne donc un argument supplémentaire et facilement interprétable par l’ensemble des acteurs-métiers du bureau d’études.

Le tableau 26 présente les sept indicateurs retenus par le groupe projet.

Tableau 26 : Indicateurs ergonomiques retenus dans la démarche PEAM.

Indicateurs ergonomiques	Références
Sécurité au travail	Boothroyd, G. & Alting, L., 1992
Efforts	Wani, M.F et al., 1999
Postures	Gomes De Sa, A et al., 1999
Collisions	Amundarain et al., 2002
Champ visuel	Amundarain et al., 2003
Charge mentale	Di Gironimo et al., 2004
Temps	Moreu De Leon et al., 2012
	Regazzoni, D et al., 2013
	Marzano, A et Al., 2015

Ainsi, en accord avec les conclusions du chapitre 2 et en accord avec le groupe projet, nous adressons les indicateurs évaluables au travers des outils de simulation. Cependant, le chapitre 2 n’a évalué que trois outils de simulation : modèle 3D avec mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique. Or, les experts en maintenabilité dans le groupe projet ont insisté pour que le modèle 3D, seul, puisse servir pour intégrer le facteur humain. En effet, dans les phases très préliminaires, lors des premières esquisses, le modelleur, seul, peut anticiper de potentielles futures interactions (collisions) entre l’opérateur et l’environnement de travail, notamment au regard des espaces de travail, en se basant sur la norme MIL STD 1472 appelée « Design criteria human engineering », déjà utilisée par les acteurs-métiers en maintenabilité. Sans intégration d’un mannequin numérique, l’usage de cette norme associée au modèle 3D reste une solution d’analyse acceptable pour les toutes premières étapes du processus de conception.

Egalement, en accord avec le groupe projet et les spécialistes en facteur humain qui le composent, il a été décidé de dissocier les outils de simulation faisant participer ou non des opérateurs réels. En effet, afin d’anticiper le protocole d’usage de chacun des outils de simulation à des fins de mieux prendre en compte le facteur humain, la préparation de ces outils sera différente suivant la présence ou non d’opérateurs réels.

Les résultats vont donc permettre de contextualiser le choix d’un seul outil de simulation en fonction des indicateurs ergonomiques pouvant être utilisés.

3.3.3. Résultats et discussion

Après avoir déclenché le pré-déploiement de la démarche PEAM, il a été proposé de présélectionner des outils de simulation en fonction de la zone de travail sur l’hélicoptère et la phase du processus dans laquelle se déroule l’analyse. Afin de sélectionner un seul outil de simulation, il a été choisi, avec le groupe projet, et au regard des résultats des chapitres 1 et 2, d’associer des indicateurs ergonomiques évaluables par des non experts en facteur humain au travers de quatre outils de simulation : modeleur seul (sans le mannequin numérique), mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique.

Le tableau 27 résume les indicateurs ergonomiques associés avec les outils de simulation.

Tableau 27 : Indicateurs ergonomiques en fonction de l’outil de simulation et des zones de travail sur l’hélicoptère. (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).

M Physique	MN Physique	RV Physique et organisation	MP Physique, cognitive et organisation
			
Sans opérateur réel Analyse statique		Avec opérateur réel Analyse dynamique	
<ul style="list-style-type: none"> • Collision 	<ul style="list-style-type: none"> • Posture • Force • Champ visuel • Collision • Sécurité au travail 	<ul style="list-style-type: none"> • Posture • Force • Champ visuel • Collision • Charge mentale • Sécurité au travail 	<ul style="list-style-type: none"> • Posture • Force • Collision • Sécurité au travail • Champ visuel • Charge mentale • Temps

Les étapes développées dans cette partie peuvent être formalisées sous forme de processus décrit en figure 49. Ce processus poursuit la logique de la figure 43. Il est donc basé sur des approches déjà exploitées dans la littérature scientifique, en facteur humain, qui permettent de sélectionner, par exemple, les variables anthropométriques les plus adaptées en fonction de l’activité de l’opérateur (Molenbroek et al., 2005; 2006 ; Bertilsson, 2010). Ainsi lorsque PEAM est déployée, la pré-sélection des outils de simulation intervient dans les étapes 8 (sélection de la zone de travail) et 9 (sélection de l’étape du processus de conception). La sélection d’un seul outil de simulation commence au travers des étapes 11 et 11’, lorsque l’acteur-métier choisit l’outil de simulation en fonction des indicateurs ergonomiques et de la participation d’un opérateur réel ou non.

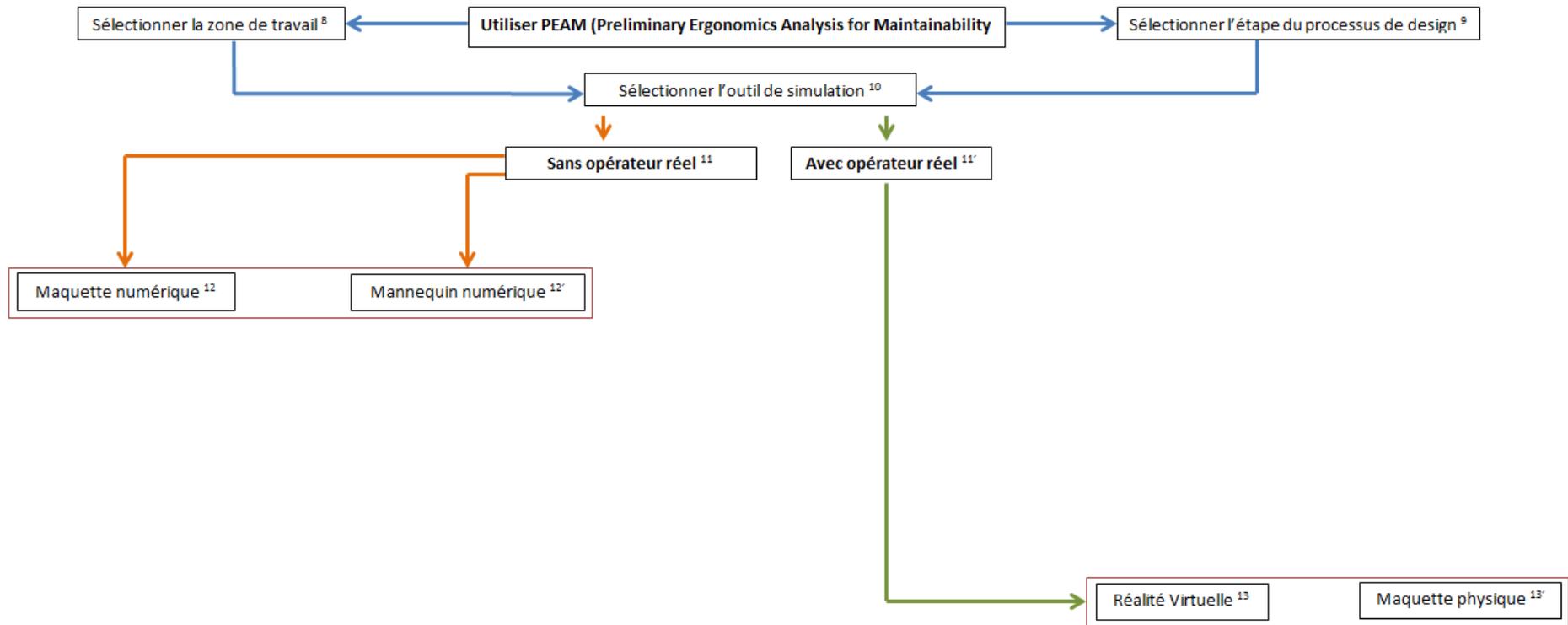


Figure 49 : Processus détaillant la deuxième étape de la démarche PEAM: le choix de l’outil de simulation.

Cette troisième partie de la démarche PEAM doit permettre à l’acteur-métier en maintenabilité de sélectionner le bon outil de simulation pour réaliser une analyse en facteur humain. Cette sélection se base sur trois aspects : la phase du processus de conception, la zone de l’hélicoptère sur laquelle l’analyse sera réalisée, les indicateurs ergonomiques pouvant être évalués à travers l’outil de simulation.

Une fois cette étape réalisée, la démarche PEAM doit fournir à l’acteur-métier en maintenabilité les bonnes pratiques pour préparer la simulation à des fins d’analyses de facteur humain. Ainsi, la suite de la démarche PEAM doit fournir à l’acteur-métier un protocole adapté à chaque outil de simulation.

3.4. Protocole d’usage des outils de simulation pour réaliser des études de facteur humain

3.4.1. Objectif

Lorsque l’outil de simulation a été correctement sélectionné par l’acteur-métier en maintenabilité, il doit pouvoir préparer son utilisation en vue de réaliser une analyse du facteur humain. Ainsi, l’objectif de cette partie est de décrire la mise en place du protocole. Ce protocole dépend d’abord de la participation ou non d’un opérateur réel mais également de l’outil de simulation en lui-même. Nous avons en effet défini dans l’étape précédente les indicateurs ergonomiques évaluables aux travers de chacun des quatre outils de simulation retenus.

3.4.2. Méthodes et techniques

Pour analyser l’activité des opérateurs de maintenance au travers des outils de simulation numériques et physiques, il convient de bien préparer et donc d’anticiper l’expérimentation. L’objectif est de fournir à chaque acteur-métier en maintenabilité un protocole simple que chacun pourra respecter afin d’assurer une homogénéité dans la passation des tests. Nous avons, pour cette étape, réalisé une concertation avec le groupe projet, lors de deux réunions de deux heures. Sur la base des échanges et de la littérature, il a été choisi d’appliquer un protocole dédié pour chaque outil de simulation. En effet, la littérature (Béguin et Weill-Fassina, 1997 ; Rabardel et al., 2014) précise la nécessité de cadrer les protocoles expérimentaux afin de réaliser des analyses ergonomiques reproductibles permettant d’étudier rigoureusement l’activité de travail observée. Ainsi, le groupe de travail a décidé de baser le protocole sur celui établi en chapitre 2 pour chaque outil de simulation.

Tout d’abord, le choix des opérateurs, qu’ils soient digitaux ou réels, est essentiel et concerne la première étape dans la préparation de l’analyse. La population des opérateurs de maintenance se compose d’hommes et de femmes, il est donc important de tenir compte des caractéristiques

physiques de chacun de ces sexes. Avec le groupe de travail, nous nous sommes basés sur la norme ISO 15537 intitulée « Principes de choix et d'utilisation de sujets d'essai pour l'essai des aspects anthropométriques des produits industriels et leur conception » afin de sélectionner les dimensions anthropométriques les plus pertinentes au regard de l'environnement de travail. Pour bien comprendre cette norme et l'interprétation qu'en a fait le groupe de travail pour l'adapter au département maintenabilité, nous avons réalisé la figure 50. Pour sélectionner les mannequins numériques ou les opérateurs réels afin d'étudier une tâche de maintenance, il faut d'abord essayer d'anticiper les interactions potentielles entre l'opérateur et l'environnement (architecture de l'hélicoptère dans notre cas). Des dimensions cruciales vont alors se dégager aussi bien sur l'hélicoptère que sur l'opérateur. Par exemple, si une tâche est réalisée dans la cabine de l'hélicoptère, la dimension cruciale sera la hauteur entre le plancher et le plafond de la cabine. La dimension anthropométrique associée à cette dimension cruciale sera la stature. Afin de ne pas complexifier la procédure de sélection des opérateurs, nous avons décidé après concertation avec le groupe de travail, de retenir certaines dimensions anthropométriques. En effet, le spécialiste en maintenabilité et le spécialiste en facteur humain du groupe de travail ont considéré qu'il y avait deux cas d'accessibilité récurrents dans un hélicoptère, le corps entier ou les mains/bras (à travers les trappes qui sont nombreuses sur un hélicoptère). Il a été retenu des dimensions facilement mesurables pour des non experts en maintenabilité :

- Accessibilité corps entier : stature, largeur des hanches, largeur des épaules, longueur des jambes ;
- Accessibilité mains/bras : stature, longueur du bras, longueur de la main et largeur de la main.

Le groupe de travail a décidé la prise de mesure en deux temps. Pour la sélection des opérateurs, seule la stature sera demandée. Le contexte industriel ne facilitant pas le « recrutement » des opérateurs de maintenance, l'acteur-métier en maintenabilité pourra simplement demander la stature des opérateurs. Une fois la sélection réalisée, il pourra affiner ces mesures qui pourront lui apporter des informations supplémentaires quant au comportement de l'opérateur pour réaliser une tâche de maintenance. Egalement, concernant les opérateurs réels, en accord avec le groupe projet, nous proposons de sélectionner des opérateurs avec une expérience d'au moins 10 ans en maintenance d'hélicoptères afin de pouvoir recueillir un maximum de retours d'expériences.

Pour la réalité virtuelle, en accord avec les résultats de notre expérimentation du chapitre 2, nous avons proposé une formation systématique des opérateurs afin de les habituer au monde virtuel. Cette formation doit se dérouler une semaine avant la simulation, chaque opérateur est immergé afin de s'habituer et de s'approprier l'environnement. Cela permettra de définir des bonnes pratiques pour l'opérateur, afin qu'il ne soit pas dérouté et qu'il adopte un comportement proche du réel. L'étude de Anglin et al., 2017, a notamment montré que l'adaptation à l'environnement virtuel doit être anticipée par des formations pour mieux appréhender la perception visuelle et moteur et réduire l'écart avec le monde réel lors de simulation.

Chapitre 3 – Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique

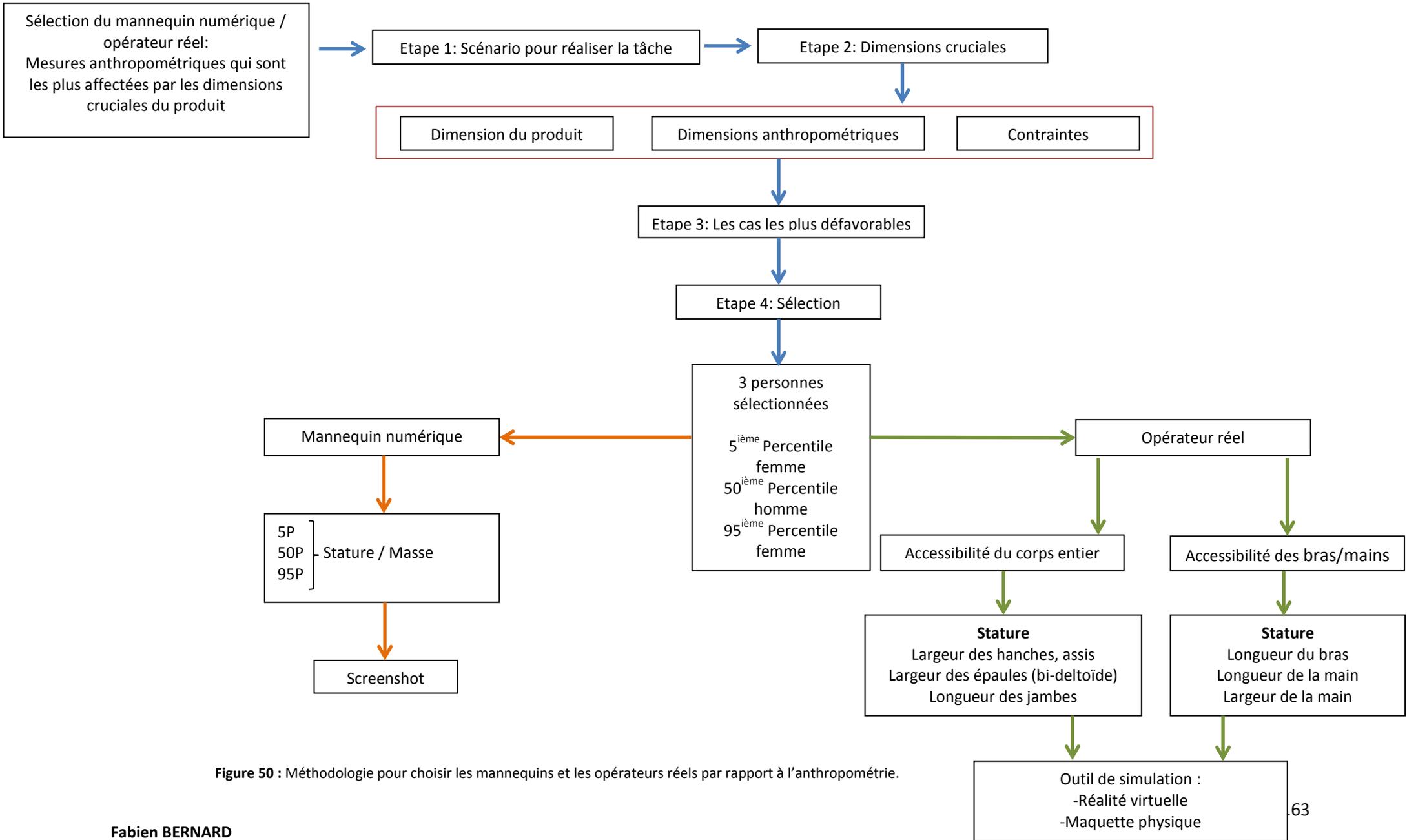


Figure 50 : Méthodologie pour choisir les mannequins et les opérateurs réels par rapport à l’anthropométrie.

Egalement, sur la base du protocole établi en chapitre 2, l’usage déjà effectué de la plate-forme de réalité virtuelle par les acteurs-métiers en maintenabilité, le groupe projet s’est accordé sur la nécessité d’intégrer des composants physiques afin de synchroniser le monde virtuel avec le monde réel. Même si cette pratique est déjà réalisée lors des analyses de maintenabilité, il nous a semblé important de le rappeler pour assurer une homogénéité dans le déploiement du protocole.

En rappelant que la démarche PEAM ne se substitue pas à l’expertise d’un ergonome, il est demandé aux acteurs-métiers en maintenabilité de faire des prises de vues de leur simulation, sous forme de vidéos, photos et/ou impressions d’écran afin qu’ils puissent communiquer avec des spécialistes en facteur humain si cela se révèle nécessaire. Ces prises de vues permettront de ne pas systématiquement refaire une simulation avec des opérateurs réels qui reste compliquée à mettre en œuvre dans un contexte industriel.

Concernant le modèle 3D, sans mannequin numérique, il n’y a pas de prérequis pour préparer le modèle 3D. En accord avec le groupe projet, une analyse du facteur humain avec cet outil, pour garder une dynamique projet en phase préliminaire, doit s’appuyer uniquement sur des normes ergonomiques déjà connues et reconnues. Nous détaillerons ce point plus tard.

3.4.3. Résultats et discussion

Le tableau 28 résume les prérequis pour chacun des quatre outils de simulation.

Tableau 28 : Prérequis pour préparer chaque outil de simulation à une analyse de facteur humain (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).

M	MN	RV	MP
			
X	<ul style="list-style-type: none"> • Insérer trois mannequins européens : 5^{ème} femme, 50^{ème} homme, 95^{ème} centile homme • Faire une capture d’écran 	<ul style="list-style-type: none"> • Choisissez 3 opérateurs avec les caractéristiques suivantes: <ol style="list-style-type: none"> 1. Même sexe, représentant le panel de population étudié, 2. Trois tailles différentes (5^{ème} femme, 50^{ème} homme, 95^{ème} centile homme), 3. Indice de masse corporelle (IMC) similaire si possible, 4. Niveau similaire (qualification et expérience) avec 10 ans d’expérience, 5. Former les opérateurs s'ils ne connaissent pas le système de RV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Choisissez 3 opérateurs avec pour caractéristiques: <ol style="list-style-type: none"> 1. Même sexe, représentant le panel de population étudié, 2. Trois tailles différentes (5^{ème} femme, 50^{ème} homme, 95^{ème} centile homme), 3. Indice de masse corporelle (IMC) similaire si possible, 4. Niveau similaire (qualification et expérience) avec 10 ans d’expérience, • Observer et enregistrer avec la caméra (photos et vidéos) - prendre le plan sagittal et frontal de l’opérateur

- Ajouter des éléments physiques pertinents pour synchroniser le virtuel et le réel
 - Observer et enregistrer avec la caméra (photos et vidéos) - prendre le plan sagittal et frontal de l’opérateur
 - Faire une capture d’écran
-

Cette étape de la démarche PEAM permet de proposer aux acteurs-métiers du département maintenabilité un protocole simple leur permettant de préparer chaque outil de simulation à des fins d’études en facteur humain. Ce protocole, discuté avec le groupe projet, permet également d’assurer que les protocoles associés à chaque outil de simulation sont réalisables par tous les acteurs-métiers de la maintenabilité, en un temps réduit. Si les protocoles sont trop complexes, demandant du matériel spécifique, le temps de préparation serait trop long et la démarche PEAM aurait des difficultés à être utilisée de manière systématique. Notre approche permet de rester dans les préconisations que l’on retrouve dans la littérature scientifique. En effet, nous respectons les recommandations des auteurs Béguin et Weill-Fassina, 1997 ; Rabardel et al., 2014 qui détaillent la mise en place de protocoles structurés et homogènes pour assurer des simulations efficaces en vue de réaliser une analyse ergonomique. Egalement, pour optimiser les résultats lors de l’usage de la plate-forme de réalité virtuelle, nous avons précisé la mise en place d’éléments physiques à synchroniser avec le monde virtuel. Cette approche se base sur les travaux de Boy (2018) qui décrit les éléments tangibles comme essentiels pour assurer une tangibilité physique d’une part mais également figurative d’autre part. L’opérateur immergé adoptera ainsi un comportement réaliste en termes de postures, gestes... et aura une meilleure compréhension et perception de son environnement.

3.5. Analyse du facteur humain

3.5.1. Objectif

L’analyse du facteur humain est donc la dernière étape de la démarche PEAM. Elle doit permettre d’étudier une situation de travail, en l’occurrence une tâche de maintenance sur hélicoptère, au travers d’un outil de simulation numérique ou physique. L’objectif de ce chapitre est de détailler les outils de mesures et d’analyses qui seront utilisés par les acteurs-métiers en maintenabilité, qui rappelons-le, n’ont que peu de connaissances en facteur humain. Nous distinguerons deux types d’approches : avec et sans opérateurs réels. Nous détaillerons ainsi dans un premier temps les outils d’analyse à utiliser uniquement avec des opérateurs réels simulant une activité à travers la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. Dans un deuxième temps, nous détaillerons les choix qui ont été faits pour déployer des outils d’analyse du facteur humain communs aux outils

de simulation, avec ou sans opérateurs réels (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique).

3.5.2. Méthodes et techniques

La méthode détaille le choix des outils d’analyse en facteur humain pour trois outils de simulation : mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique. Cependant, rappelons qu’en accord avec le groupe projet, la possibilité d’utiliser le modèle numérique seul (modeleur) sans y intégrer de mannequin numérique a été actée. Ce choix a été fait pour les phases très préliminaires, lors des premières esquisses d’une architecture produit, pour assurer le dimensionnement d’espaces, de volumes comme les trappes d’accès, en accord uniquement avec la norme MIL STD 1472 appelée « Design criteria human engineering ». Cette norme propose en effet des dimensions d’architectures se basant sur des références anthropométriques. Cette norme est déjà utilisée ponctuellement et maîtrisée par les acteurs-métiers en maintenabilité, leur apportant les informations essentielles en phases préliminaires. L’objectif ici est de systématiser l’usage de cette norme grâce au déploiement de la démarche PEAM.

3.5.2.1. Analyse avec opérateur réel

Nous détaillons, dans un premier temps, les outils proposés lorsqu’un opérateur de maintenance réel est sollicité, c’est-à-dire au travers de la plateforme de réalité virtuelle ou de la maquette physique.

Les informations démographiques sont essentielles pour mieux connaître la population étudiée. Même si, comme expliqué plus haut, la sélection s’est faite autour de critères anthropométriques et d’un niveau de qualification similaire entre individus, il convient d’aller plus loin pour comprendre les variabilités existantes entre les opérateurs qui pourraient expliquer des différences dans l’observation du travail.

Nous reprenons les mêmes principes qui ont été vus dans la construction du questionnaire lors de la deuxième expérimentation. Nous rappelons ici que le questionnaire doit être rapidement rempli, généralement en moins de 10 minutes (Bradburn et al., 2004), qu’il doit permettre de récolter des données standardisées à des fins d’analyses statistiques (Fenneteau, 2015). En effet, si l’acteur-métier en maintenabilité a un doute sur les résultats et leurs compréhensions, il peut contacter un spécialiste en ergonomie. Ce dernier reprendra l’analyse à travers l’expérimentation déjà réalisée, incluant donc la passation des questionnaires, qu’il pourra ainsi analyser plus finement. Le questionnaire est présenté en annexe 2. Il permet de connaître les métiers, les formations ou encore les postes antérieurs de l’opérateur.

Un questionnaire sur les douleurs ressenties est à faire remplir par l’opérateur immédiatement après la réalisation de la tâche de maintenance, qu’elle soit réalisée sur la plateforme de réalité virtuelle ou sur la maquette physique. Il vise à lui faire cibler, sur une silhouette (Figure 51), les zones

corporelles sur lesquelles il a ressenti des gênes au cours de l’activité réalisée. Cette approche vient directement du questionnaire Nordique (Kuorinka et al., 1987). Ce questionnaire est souvent utilisé par les médecins du travail pour dépister les troubles musculo-squelettiques. Il vise à identifier les zones de douleurs à travers une silhouette (figure 51) et entrer dans le détail à travers 30 questions. Le groupe de travail n’a pas souhaité diffuser l’entièreté du questionnaire Nordique, jugé trop long pour être rempli par des opérateurs de maintenance qui sont volontaires, sur leur temps de travail, pour participer aux simulations. En revanche, la silhouette a été gardée comme support clair, rapide et efficace pour situer les gênes ressenties durant l’activité de maintenance.

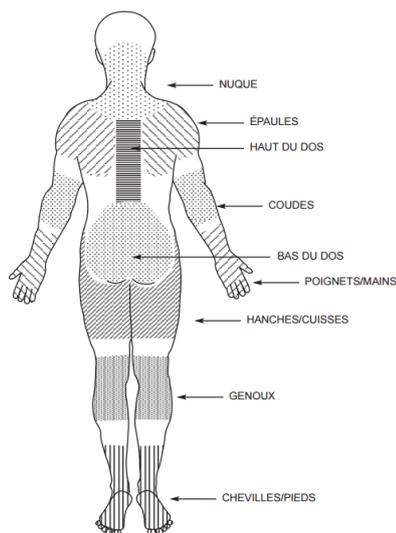


Figure 51 : Silhouette permettant de sélectionner les zones douloureuses pendant l’activité (extrait du questionnaire Nordique).

Le questionnaire sur les douleurs ressenties, **l’échelle de Borg** (permettant de mesurer la perception de l’effort durant une activité physique) doit être rempli par l’opérateur immédiatement après la réalisation de la tâche. Ainsi, sa version récente CR10 a été retenue, en accord avec le groupe de travail, puisqu’elle est courte, portant uniquement sur une échelle de 1 à 10 contrairement à sa version plus ancienne portant sur une échelle de 0 à 20. La version CR10 est donc plus rapide à lire pour le lecteur et plus compréhensible. Elle est ainsi notée de 0 pour aucun effort à 10 pour un effort considéré comme « très dur » en accord avec les travaux de l’auteur (Borg, 1982).

Un questionnaire de charge mentale est également proposé afin d’analyser la dimension cognitive. En effet, l’activité de maintenance impose parfois une charge cognitive élevée, associée à une organisation complexe et imprévisible (Misra, 2008). En accord avec le groupe projet, nous proposons alors à l’acteur-métier en maintenabilité de faire remplir par l’opérateur réel, après chaque simulation, le questionnaire NASA-TLX (« National Aeronautics and Space Administration – Task Load Index ») (Hart & Staveland, 1988). Nous rappelons que c’est une évaluation subjective de la charge de travail mental basée sur six dimensions: exigence mentale, exigence physique, exigence de temps, performance personnelle, frustration et stress. Il fournit une note globale notée de 0 à 100, spécifiant si la charge de travail mental est faible (≤ 30) ou élevée (≥ 30). L’existence d’application téléphone facilite la retranscription des résultats de chacune des six dimensions. En revanche, le questionnaire au format papier doit être conservé car le spécialiste en ergonomie, s’il est consulté, doit avoir accès à l’ensemble des résultats pour analyser en détail le score de chacune des dimensions et leur pondération.

Le temps est une donnée importante, notamment si un spécialiste en ergonomie reprend le travail et souhaite, par exemple, évaluer des efforts. En effet, plusieurs normes, comme la MIL STD 1472 ou la norme NF EN 1005-4 intitulés « Performance physique humaine - Partie 4 : Evaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines » évaluent un effort en fonction du temps d’exposition. L’acteur-métier utilisera alors un chronomètre. Comme nous l’a montré le chapitre 2, avec le dispositif matériel actuel disponible chez l’industriel, l’analyse du temps n’est fiable qu’au travers de la maquette physique.

En résumé, lorsque la simulation fait intervenir des opérateurs réels, il est demandé à l’acteur-métiers en maintenabilité de déployer les outils suivants :

- Questionnaire sur les informations démographiques ;
- Questionnaire sur les douleurs ressenties (silhouette tirée du questionnaire Nordique) ;
- Echelle de Borg pour évaluer les gênes ressenties ;
- Un questionnaire de charge mentale avec le NASA-TLX ;
- Un chronomètre pour évaluer le temps.

3.5.2.2. Analyse avec et sans opérateur réel

Le critère de sécurité au travail a notamment était largement discuté en groupe projet. La sécurité au travail est un indicateur phare dans nos études, notamment au vu des rapports réalisés par l’Association Française des Ingénieurs en Maintenance (AFIM). La maintenance est la première cause d’accidents en entreprise avec presque 20% de l’ensemble des accidents survenant sur la totalité des activités d’une entreprise. En accord avec l’industriel, fabricant d’hélicoptères, et la littérature scientifique (INRS, 2017), nous avons recensé 8 indicateurs de la sécurité au travail en maintenance tels que:

1. Chute de hauteur (travail en hauteur),
2. Coupure,
3. Collision,
4. Brûlure,
5. Contact avec un fluide hydraulique,
6. Choc électrique,
7. Pincement,
8. Respiratoire (inhalation de produits toxiques).

Ces huit risques n’ont pas tous été observés directement au cours de nos différentes analyses (chapitre 2). Cependant, en accord avec le département hygiène et sécurité de l’industriel aéronautique partenaire de cette recherche, nous avons recensé huit risques qui, par le passé, ont été identifiés. Par la suite, nous avons interrogé huit opérateurs de maintenance ainsi que les acteurs-métiers du département maintenabilité, pour confirmer la prise en compte de ces huit indicateurs. Précisons également, que ces indicateurs font partie des risques relevés par l’Institut National Pour la Recherche et la Sécurité (INRS), dans sa rubrique documentaire « organisation de la

maintenance » (INRS, 2017). D’ailleurs, nous pouvons préciser que d’autres risques peuvent apparaître comme les vibrations ou encore les variations de températures.

Afin de créer un système de notation de ces huit indicateurs de risque, nous nous sommes appuyés sur les matrices de risque (Cox, 2008). Nous avons ainsi identifié, pour chaque indicateur, trois niveaux de risque que nous résumons dans le tableau 29 :

Le premier concerne l’occurrence, c’est-à-dire s’il existe un risque répété que l’opérateur se blesse, quel que soit l’indicateur, pendant la réalisation d’une tâche de maintenance.

Le deuxième niveau identifié concerne le degré d’impact pour l’environnement, dans notre cas, l’hélicoptère. En d’autres termes, nous cherchons à identifier si lors de la réalisation de la tâche de maintenance, l’impact de l’opérateur sur l’hélicoptère est mineur ou fort.

Le troisième et dernier niveau concerne l’identification du degré d’impact de l’activité de maintenance sur l’opérateur. Nous cherchons à identifier, s’il existe un risque de blessures, si elles peuvent être insignifiantes ou gravissimes.

Tableau 29 : Notation des indicateurs de sécurité au travail en termes d’occurrence, d’impact sur l’environnement, d’impact sur l’opérateur.

	1	2	3	4	5
Occurrence (par jour) quand l’opérateur réalise la tâche de maintenance	Rare	probable	Possible	Régulier	permanent
Conséquence sur l’environnement (hélicoptère)	Insignifiante (Pas de dommage)	Mineure (léger impact)	Modérée (Dommage à vérifier, peut entraîner un dysfonctionnement non catastrophique)	Majeure (Impact majeur, dysfonctionnement catastrophique à court terme)	Catastrophique (dommage irréversible / accident en vol)
Conséquence sur l’opérateur	Insignifiante (Pas de blessure)	Mineure (Blessures légères)	Modérée (Visite médicale nécessaire)	Majeure (Blessures graves - hospitalisation)	Catastrophique (décès)

La posture, l’effort, le champ visuel et les conditions de travail (températures, humidité...) sont également des indicateurs ergonomiques essentiels en maintenance. Le chapitre 1, au travers de notre état de l’art (Moreu De Leon et al., 2012 ; Regazzoni, D et al., 2013 ; Marzano, A et Al., 2015) a montré que ces quatre indicateurs influençaient de manière importante l’activité de maintenance. Le groupe de travail a également confirmé que leurs études étaient essentielles afin de bien comprendre les futures difficultés que rencontrerait l’opérateur de maintenance. Afin d’évaluer la posture, l’effort, le champ visuel et les conditions de travail, nous proposons d’utiliser un outil déjà en place au sein d’Airbus Group. Evidemment, sans connaissance spécifique en facteur humain, l’analyse quantitative peut paraître très complexe, voire subjective. Or, de nombreux outils d’observation permettent aujourd’hui, à travers une étude de l’activité, de retranscrire les

caractéristiques de ce qui est observé. Par exemple, l'outil EAWS (Ergonomics Analysis WorkSheet) permet d'analyser des situations de travail complexes en quantifiant les postures observées (Schaub et al., 2012). Certains travaux ont même évalué l'efficacité d'un tel outil en l'automatisant à une plate-forme de réalité virtuelle (Bortolini et al., 2018). L'industriel aéronautique a également travaillé sur cet axe d'automatisation et d'acquisition de données observées dans des situations de travail ciblées. En effet, l'ergonomie et la sécurité du travail dans les chaînes d'assemblage sont évaluées depuis longtemps pour assurer une production toujours plus rapide, plus fiable et plus sûre pour l'opérateur. Ainsi, il a été développé un outil pour évaluer le facteur humain au poste de travail sur les chaînes d'assemblage suivant quatre indicateurs : « **Charge physique** », « **Position du corps** », « **Visibilité / précision** » et « **condition d'exécution** ».

Cet outil nous a particulièrement intéressés pour deux raisons principales:

- La volonté de fédérer et de déployer l'outil pour un usage à grande échelle pour tous, qui laisse donc penser qu'il est simple, clair et pertinent pour qu'il soit utilisé et adopté par un grand nombre d'acteurs-métiers,
- La volonté d'harmoniser et d'homogénéiser les informations qui découlent des études ergonomiques devant donc partir d'un outil unique, permettant ainsi d'harmoniser des standards de références.

La philosophie adoptée sur cet outil correspond à notre volonté de résoudre très tôt dans le processus de conception notre problématique, c'est-à-dire mieux prendre en compte le facteur humain par le biais d'outils de simulation. L'outil automatisé s'appelle EMMA (Ergonomie Merkmal Methode Airbus) et a été développé par des ergonomes allemands. Cet outil d'analyse se base sur la méthode papier KIM (Key Indicator Method) (Klussmann et al., 2010) qui évalue les postures, les efforts (statiques, répétés), le champ visuel ainsi que certaines conditions de travail (volume de travail suffisant pour varier les postures, température...). L'outil EMMA est aujourd'hui utilisé par des chefs d'atelier n'ayant que peu d'expérience en ergonomie. Pour des raisons de confidentialité nous ne pouvons pas donner l'ensemble des critères d'évaluation ergonomique avec leur représentation, cependant, deux exemples peuvent être publiés. Le premier concerne la perceptibilité des détails (Figure 52). Le pictogramme au centre indique une lecture et/ou une compréhension facile de consignes ou de détails à visualiser dans l'environnement de travail direct. Celui de droite, qui est très peu lisible et bien plus petit que le pictogramme central, signifie une mauvaise perception avec un risque de ne pas voir certains détails essentiels pour mener à bien la tâche de maintenance.



Figure 52 : Représentation de la perceptibilité visuelle des détails de l'environnement de travail sous l'outil EMMA.

Le deuxième exemple (figure 53) questionne sur la possibilité pour l'opérateur de reposer son bras sur un support et donc de diminuer la charge physique en sollicitant un peu moins les membres supérieurs. On voit bien sur le pictogramme au centre le bras reposer sur un objet ce qui n'est pas le cas sur le pictogramme de droite.

Appui main-bras disponible ?	Oui 	Non 
------------------------------	---	---

Figure 53 : Représentation de la possibilité de reposer son bras sur un support pendant l’activité de travail.

Lorsque l’évaluation est terminée, le score, pour chaque indicateur (**Charge, Position du corps, Visibilité / précision et condition d’exécution**) est noté de 1 à 4 :

- 1 : normal
- 2 : non critique
- 3 : limité
- 4 : contraignant

3.5.2.3. Analyse globale du facteur humain

En regroupant l’analyse de risques et les scores provenant de l’outil EMMA, nous créons un lien avec les scores initialement connus des acteur-métiers en maintenabilité (A, B, C et D). Pour ce faire, après un long échange avec le groupe de travail, nous avons décidé de créer un algorithme sur la base méthodologique de la méthode RULA (McAtamney & Corlett, 1993). Il nous faut ainsi générer un seul score pour l’ensemble des indicateurs de l’analyse de risques et un seul score pour l’analyse EMMA.

Score général de l’analyse de risques :

Pour chacune des trois dimensions (occurrence, conséquence sur l’hélicoptère et conséquence sur l’opérateur), il faut adresser le score suivant :

- Si tous les scores < 3 = **0**
- Si 1 score ≥ 3 = **1**
- Si 2 scores ≥ 3 = **2**
- Si 3 scores ≥ 3 = **3**

Le score de l’analyse de risques se calcule alors :

$$\sum \text{score de risques} = \text{Score occurrence} + \text{Score conséquence sur l'hélicoptère} + \text{Score conséquence sur l'opérateur} = N$$

Score général de l’analyse EMMA :

Pour l’ensemble des classes de risques (Charge, Position du corps, Visibilité / Précision et Condition d’exécution), il faut adresser le score suivant :

- Si toutes les classes de risques < 3 = **0**
- Si 1 classe de risques ≥ 3 = **1**
- Si 2 classes de risques ≥ 3 = **2**
- Si 3 classes de risques ≥ 3 = **3**

Score général de la démarche PEAM

Toujours en accord avec le groupe projet, nous créons une matrice générale (tableau 30) faisant le lien entre le score général de risques, le score général de l’analyse EMMA et les scores de l’analyse d’accessibilité (A, B, C et D).

Tableau 30 : Matrice générale faisant le lien entre le score général de risques et le score général de l’analyse EMMA.

Risque (N)	EMMA			
	0	1	2	3
0	A	A	B	C
1	A	A	B	C
2	B	B	B	C
3	C	C	D	D
4+	D	D	D	D

3.5.3. Résultats et discussion

Nous pouvons ainsi présenter, dans la figure 54, le processus permettant de préparer les outils de simulation à des fins d’analyses du facteur humain, ainsi que le processus détaillant l’analyse facteur humain. Les étapes 19 et 20 détaillent les algorithmes à suivre pour obtenir les scores généraux provenant de l’analyse de risques et de l’outil EMMA. La matrice globale permet également de faire le lien entre l’analyse du facteur humain et le score d’accessibilité déjà connu des acteur-métiers du département de la maintenabilité. Ainsi, lorsque le score d’accessibilité est défini, plusieurs possibilités s’offrent à l’acteur-métier en maintenabilité. Ces possibilités ont été discutées et validées par le groupe projet. Si le score d’accessibilité est A, alors l’acteur-métier peut continuer son analyse de maintenabilité. En revanche, si le score est B, C ou D, il doit apporter des modifications à l’architecture, aux outillages de maintenance et/ou à la procédure de maintenance avant de devoir refaire la démarche PEAM. En réitérant la démarche PEAM, il pourra ainsi vérifier que les améliorations apportées contribuent à améliorer la situation de travail.

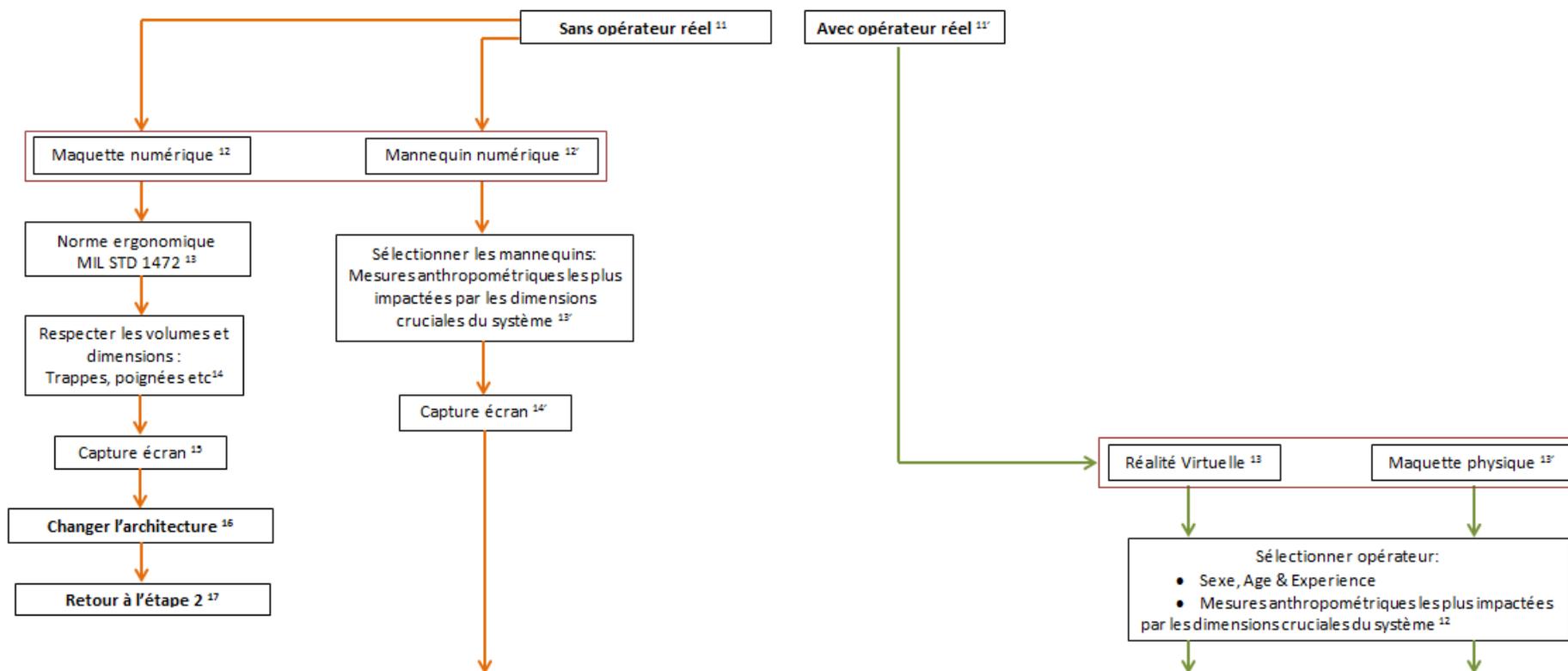
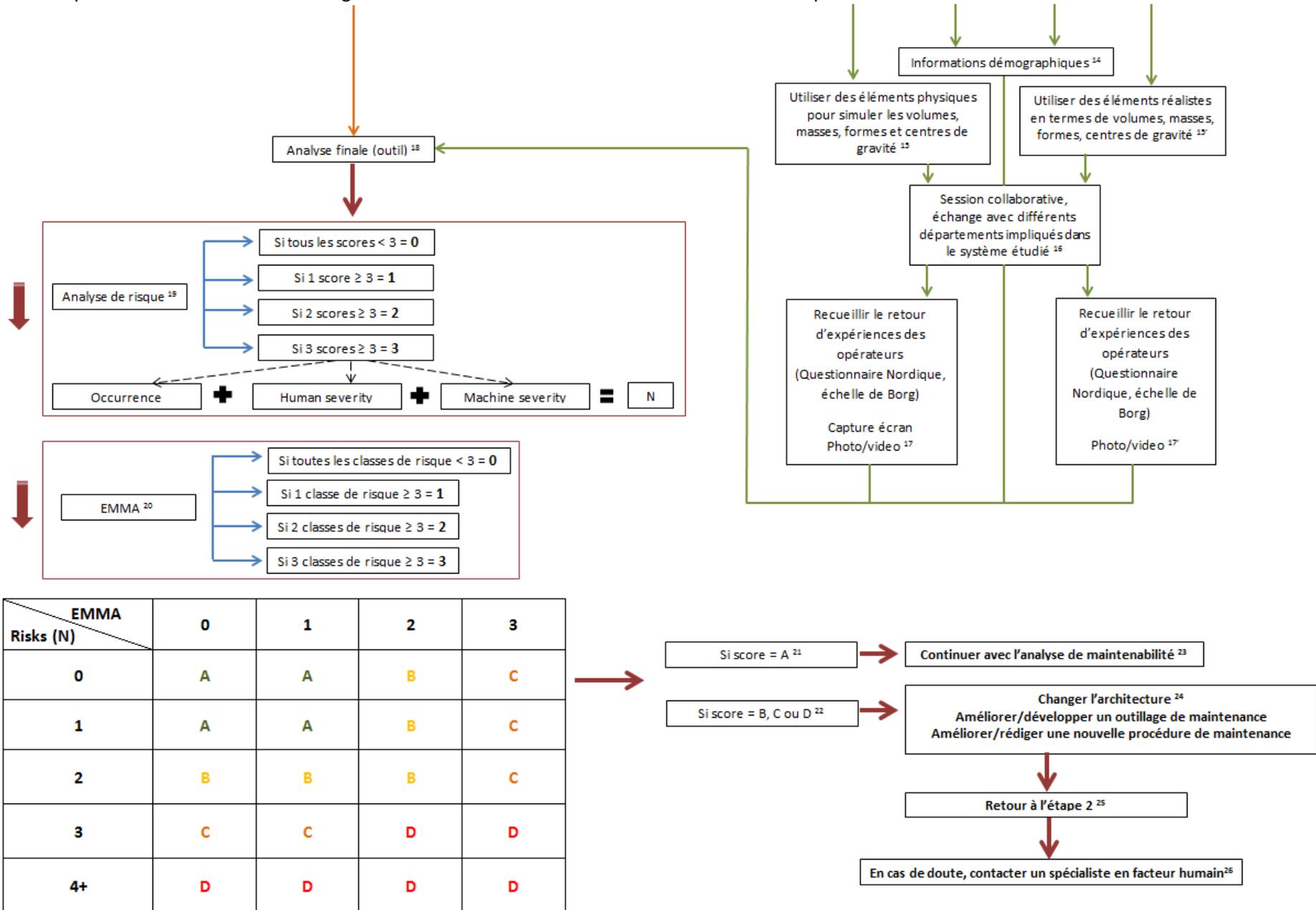


Figure 54 : Processus détaillant le protocole pour préparer les outils de simulation et l'étape pour réaliser l'analyse ergonomique, selon la démarche PEAM.

Chapitre 3 – Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique



EMMA Risks (N)	0	1	2	3
0	A	A	B	C
1	A	A	B	C
2	B	B	B	C
3	C	C	D	D
4+	D	D	D	D

Fabien BERNARD

Le groupe projet a également souhaité simplifier la matrice en l’automatisant. Ainsi, afin de faciliter la notation de l’analyse en facteur humain, nous avons créé un outil Excel qui retranscrit l’algorithme (Figure 55). Pour la première partie évaluant les indicateurs de risques, l’acteur-métier en maintenabilité analyse directement dans le fichier Excel chacun des indicateurs. Pour la partie concernant l’ergonomie physique, l’acteur-métier remplit d’abord l’outil EMMA avant de reporter le score de chacun des quatre indicateurs dans le fichier Excel. Ainsi, le score général d’accessibilité (A, B, C ou D) apparaît automatiquement à gauche tout en surlignant en orange les indicateurs les plus pénalisants, justifiant donc le score général.

Q	R	S	T	U	V	
Ergonomy (A, B, C & D access rating)						
	PEAM method					
Rating			Occurrence	Severity for the machine	Severity for the operator	
B	Risks	Fall	2	2	2	
		Cut	2	2	2	
		Collision	2	2	2	
		Burn	2	2	2	
		Contact with hydraulic	2	3	2	
		Electricity	2	2	2	
		Crushing	2	2	2	
		Toxicity (Suffocation)	2	2	2	
	EMMA	Charge	2			
		Posture	3			
		Visibility	3			
		Work condition	1			

Figure 55 : Outil Excel permettant d’automatiser l’analyse en facteur humain de la démarche PEAM.

Ce format a été choisi avec l’ensemble des acteurs métiers car son enjeu est double :

- Remplir rapidement (10 minutes) l’outil de la démarche PEAM ;
- Etre efficace pour communiquer avec les autres départements et ainsi pouvoir négocier facilement entre les critères mécaniques et l’observation ergonomique. Ce format semble, dans sa première version, pouvoir être facilement lu et compris par l’ensemble des acteurs-métiers du bureau d’étude.

Cette dernière partie de la démarche PEAM a permis de quantifier l’observation des opérateurs de maintenance au travers d’une analyse de risques et de l’outil EMMA, déjà déployé au sein d’Airbus et évaluant la dimension physique de l’opérateur en termes de charge, d’effort... L’acteur-métier en maintenabilité peut ainsi objectiver le score d’accessibilité (A, B, C ou D). Le choix des tableaux croisés et de l’outil Excel est double : réduire les temps d’analyse et faire accroître l’acceptabilité de la démarche. Cette acceptabilité pourrait être d’autant plus importante que la démarche PEAM peut être autoporteuse pour l’utilisateur, c’est-à-dire qu’elle lui permet de comprendre objectivement le score général d’accessibilité. L’acteur-métier peut alors procéder lui-même à des corrections, sans avoir l’obligation systématique de recourir à l’expertise d’un spécialiste en facteur humain.

4. Discussion sur le processus général de la démarche PEAM

Chaque étape de la démarche PEAM a été détaillée dans les parties précédentes. Nous avons réalisé, pour chacune d’elle, une figure représentant le processus qui la définit. Nous pouvons résumer la démarche suivant la logique suivante :

1. Déterminer l’usage et le déploiement de la démarche PEAM, sur la base du processus existant et utilisé par les acteurs-métiers en maintenabilité,
2. Sélectionner l’outil de simulation le plus adéquat en deux sous-étapes :
 - a) Présélectionner les outils de simulation les plus adéquats en fonction de la phase du processus de conception et de la zone de travail sur l’hélicoptère ;
 - b) Sélectionner un outil de simulation, le plus adapté, en fonction des indicateurs en facteur humain souhaitant être étudiés.
3. Préparer les outils de simulation, sous forme de protocole, à des fins d’analyses en facteur humain,
4. Analyser la situation de travail simulée et la quantifier à travers les indicateurs tels que l’analyse de risques, la posture ou encore l’effort. Cette dernière étape permet d’expliquer la note initiale (A, B, C ou D) de l’analyse d’accessibilité, permettant à l’acteur-métier de modifier lui-même la conception de la tâche de maintenance en cours de développement.

La figure 56 suivante montre le processus général de la démarche PEAM, regroupant l’ensemble des étapes expliquées dans ce chapitre. Cette démarche est née des constats issus des résultats des chapitres 1 et 2. Le chapitre 1 a détaillé comment le facteur humain est pris en compte durant les analyses de maintenabilité par les acteurs-métiers non formés au facteur humain. Egalement, le chapitre 2 a montré que les outils de simulation existants, utilisés et maîtrisés dans le département maintenabilité à des fins d’analyses techniques, peuvent aussi se révéler efficaces pour intégrer le facteur humain. Ainsi, pour supporter les analyses de maintenabilité, une démarche a été définie et développée dans ce présent chapitre. Elle a pour objectif de favoriser l’intégration du facteur humain pendant les analyses de maintenabilité en s’appuyant sur les outils de simulation existants. Pour que cette démarche puisse avoir l’impact souhaité en améliorant l’intégration du facteur humain dans le département de la maintenabilité, il est nécessaire que chaque acteur-métier du département puisse l’utiliser et l’associer à ses habitudes de travail. En effet, selon Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009, il est important de se préoccuper de l’acceptabilité, c’est-à-dire comment la nouvelle démarche va être perçue et ainsi anticiper son appropriation par les acteurs-métiers pour assurer, plus tard, une acceptation totale de la nouvelle démarche dans les habitudes de travail. Pour ce faire, nous avons choisi de construire notre démarche en l’intégrant au processus actuel des analyses de maintenabilité. Egalement, la démarche PEAM doit être utilisée uniquement quand

l’expertise de l’acteur-métier en maintenabilité décèle une problématique d’accessibilité. Il n’y a donc pas l’obligation d’utiliser PEAM à chaque analyse de maintenabilité.

L’originalité de notre démarche PEAM est son adaptation à chaque phase du processus de conception de la maintenabilité. En effet, les outils de simulation, en accord avec le chapitre 2 et les travaux de Chitescu et al., 2003, peuvent s’avérer plus ou moins performants en fonction de la phase du processus de conception dans laquelle ils sont déployés à des fins d’analyses ergonomiques. Il a donc été décidé avec le groupe de projet de distribuer les outils de simulation en fonction des phases du processus. Or, la grande majorité des travaux de la littérature en maintenabilité ne fait pas de distinction entre les phases du processus pour le déploiement des outils de simulation, que ce soit le mannequin numérique (Di Gironimo et al, 2004 ; Regazzoni et al., 2013) ou encore la réalité virtuelle (Garza et al, 2013 ; Seth et al, 2011). Les auteurs cités développent des approches pour intégrer le facteur humain sans tenir compte de la phase du processus de conception qui, pourtant, impacte grandement l’analyse ergonomique. En effet, les études de Perez & al., 2014 ; Kruger – Nguyen, 2015, montrent, par exemple, l’utilité du mannequin numérique au début du processus de conception là où les itérations sont très fortes et les données techniques changeantes. Le mannequin numérique est très facile et rapide à mettre en œuvre et s’adapte très bien à ces premières phases. Plus tard dans le processus, lorsque les phases du processus de conception ont déjà défini et figé les grandes lignes de l’architecture produites, la réalité virtuelle semble davantage préconisée (Chitescu et al., 2003). Le niveau de détails techniques de la maquette numérique devient alors plus élevé et la réalité virtuelle s’adapte très bien aux besoins de collaboration dans ces phases. En effet, plusieurs auteurs (Gherbi et al., 2006 ; Sherman, & Will, 2009; Lorisson, 2010) ont montré l’efficacité de la réalité virtuelle à faire collaborer et fédérer des groupes de travail multi-métiers. Les dernières phases du processus de conception correspondent à l’étude détaillée avant que la définition finale du produit ne soit validée. La maquette physique est alors déployée. Bayramzadeh et al., 2018 parle alors de simulation réaliste dans laquelle la validité écologique de la simulation est très forte.

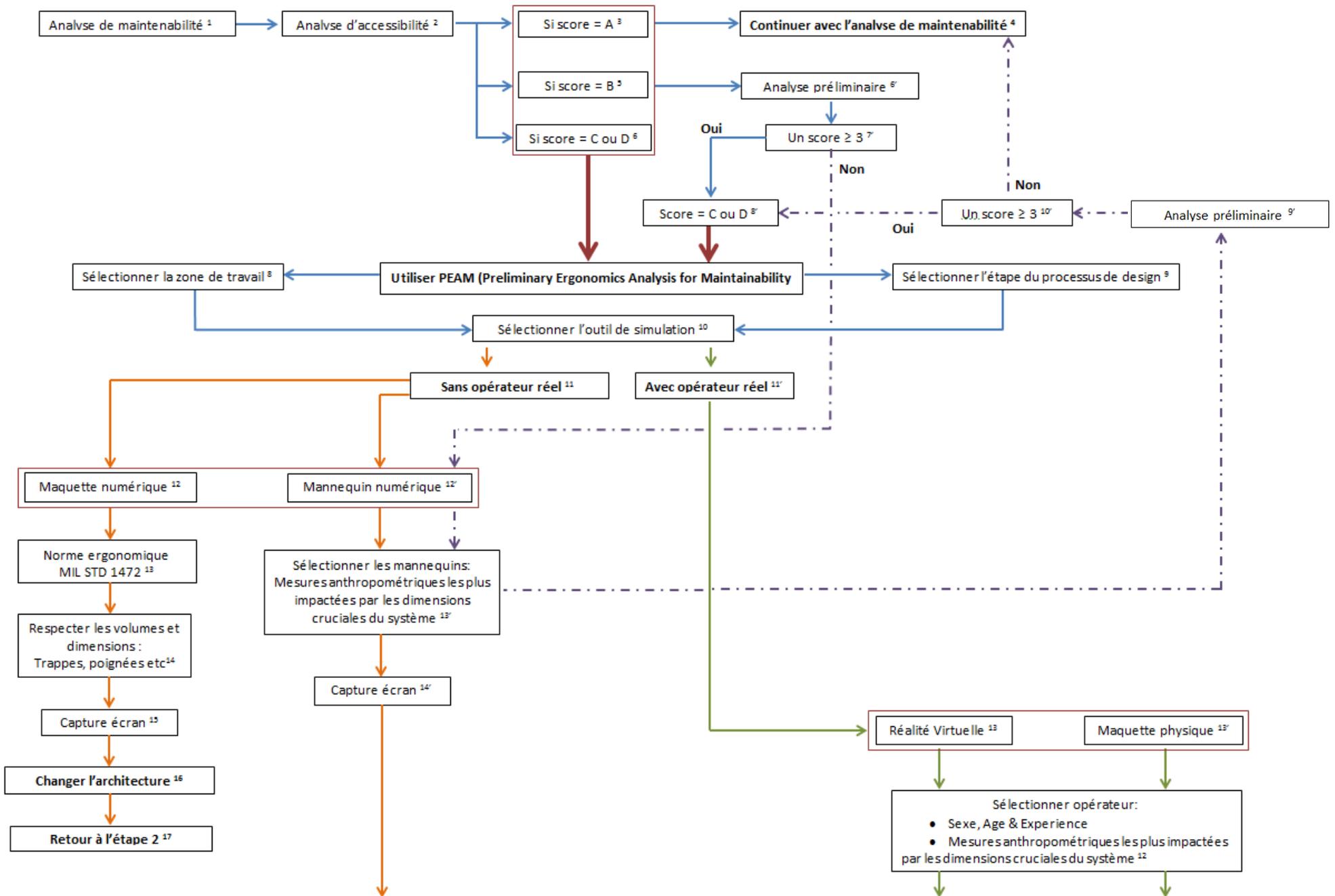
Egalement, la mise en place d’un protocole dédié à chaque outil de simulation a été décidée par l’ensemble du groupe de travail composé d’experts en maintenabilité et en facteur humain. Ces protocoles se basent sur des pratiques courantes de la littérature, notamment autour de la simulation. Notre approche permet ainsi de rester dans les préconisations et recommandations de Béguin et Weill-Fassina, 1997 ; Rabardel et al., 2014 qui détaillent la mise en place de protocoles structurés et homogènes pour assurer des simulations efficaces en vue de réaliser une analyse ergonomique. Cependant, ces protocoles, parfois complexes et dédiés aux spécialistes en facteur humain, ont été allégés en accord avec le groupe de travail pour qu’ils puissent être déployés par des non spécialistes en facteur humain pour réaliser des analyses, de la mise en place de la simulation de tâches de maintenance à l’évaluation de la situation de travail observée. Aujourd’hui, la littérature scientifique propose davantage d’outils d’analyses pour quantifier une situation de travail par des non experts en facteur humain que de démarches globales faisant appel à la mise en place de protocoles généraux pour préparer une simulation à des fins d’intégration du facteur humain en maintenabilité. En effet, dans la littérature, des outils comme RULA (McAtamney & Corlett, 1993), REBA (Hignett & McAtamney, 2000), OCRA (Occhipinti, 1998), NIOSH (Waters et al., 1993), NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988)... permettent d’analyser une des composantes de

l’ergonomie. Or, notre démarche PEAM se veut complète et adaptative à chaque outil de simulation afin d’étudier, si possible, l’ensemble des composantes de l’ergonomie (physiques, cognitives et organisationnelles) tout en s’adressant à des non experts en facteur humain.

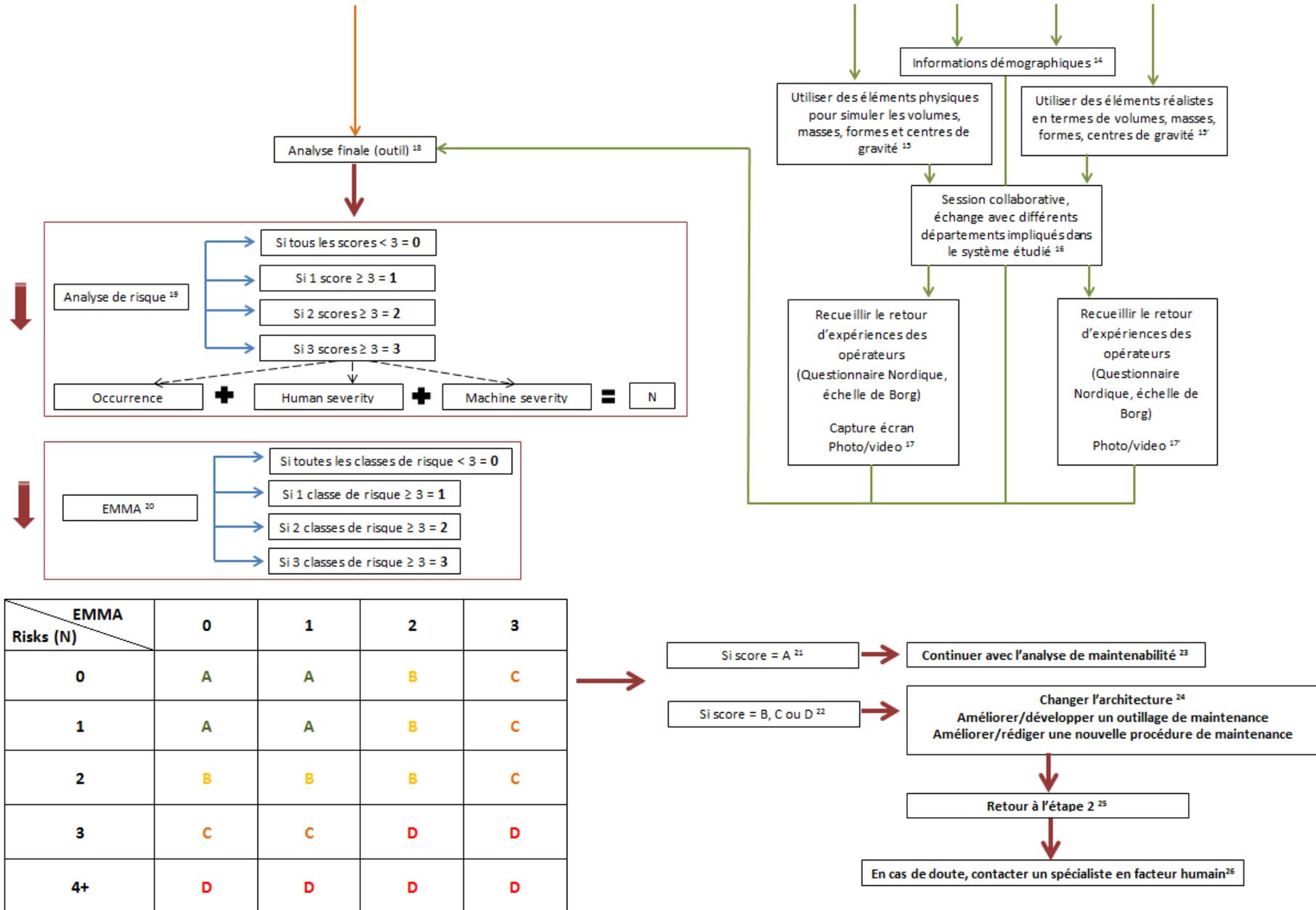
La notation de la situation de travail permet enfin à l’acteur-métier en maintenabilité d’autoévaluer une situation qu’il a lui-même conçue. Les itérations étant assez courtes entre les différents bureaux d’études, l’acteur-métier peut ainsi argumenter sur d’éventuelles problématiques soulevées par l’intégration du facteur humain dans son analyse de maintenabilité. Un spécialiste en ergonomie pourra alors, si besoin, reprendre l’analyse réalisée par l’acteur-métier en maintenabilité et investiguer davantage la tâche de maintenance simulée initialement.

Ainsi, la démarche PEAM semble adaptée à une nouvelle forme d’analyse pratiquée en autonomie par des non experts en facteur humain mais qu’il convient désormais de tester au travers de cas pratiques en maintenabilité.

Chapitre 3 – Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique



Chapitre 3 – Proposition d’une démarche d’intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique



Fabien BERNARD

Figure 56 : Processus générale de la démarche PEAM.

5. Synthèse du chapitre et perspectives

Dans cette dernière partie, nous présentons la synthèse du chapitre 3 ainsi que les perspectives permettant de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité au travers des outils de simulation.

5.1. Synthèse du chapitre

Au regard des deux premiers chapitres, nous avons soulevé la nécessité d’apporter, au département maintenabilité du bureau d’études, une démarche permettant de mieux prendre en compte le facteur humain. S’adressant à des non spécialistes en facteur humain, nous avons focalisé notre recherche sur le développement d’une démarche facilement compréhensible avec un niveau d’acceptabilité le plus élevé possible. Ainsi, pour garantir au mieux cet objectif, nous avons d’une part, gardé une partie du processus de maintenabilité actuellement utilisé, et d’autre part, construit la démarche en se basant sur des outils de simulation déjà connus et utilisés.

Ainsi, notre démarche PEAM, associée à son processus et à son outil, se construit autour de quatre axes majeurs :

1. Déterminer l’usage de la démarche PEAM, sur la base du processus existant et utilisé par les acteurs-métiers en maintenabilité,
2. Sélectionner l’outil de simulation le plus adéquat en deux sous-étapes :
 - a) Présélectionner les outils de simulation les plus adéquats en fonction de la phase du processus de conception et la zone de travail sur l’hélicoptère,
 - b) Sélectionner l’outil de simulation, le plus adapté, en fonction des indicateurs en facteur humain souhaitant être étudiés.
3. Préparer les outils de simulation, sous forme de protocole, à des fins d’analyses en facteur humain,
4. Analyser la situation de travail simulée et la quantifier à travers les indicateurs ergonomiques prédéfinis. Cette dernière étape permet à l’acteur-métier de mieux comprendre la situation de travail et de modifier lui-même la conception de la tâche de maintenance en cours de développement.

5.2. Perspectives pour favoriser l’intégration du facteur humain en maintenabilité

Cette démarche, afin d’en connaître toute l’efficacité, doit être déployée au sein même de notre industriel et être utilisée par l’ensemble des acteurs-métiers. Son introduction doit passer par une phase de pédagogie afin de l’expliquer et de former l’ensemble des utilisateurs. L’enjeu est double, d’une part de faire comprendre pourquoi il est nécessaire, voire indispensable, de mieux qualifier et quantifier le facteur humain en phase préliminaire de conception à l’aide des outils de simulation ; d’autre part de faire accepter une nouvelle démarche complémentaire à celle habituellement appliquée.

Le chapitre IV vise à évaluer la vie de cette nouvelle démarche auprès de la population ciblée, et la valider sur divers projets et études faisant appel aux outils de simulation numériques et physiques. Un protocole expérimental ainsi que des résultats statistiques seront présentés afin de prendre toute la mesure de l’intégration de cette nouvelle démarche PEAM.

CHAPITRE IV. VALIDATION DE LA DEMARCHE PEAM

Chapitre 4 : Validation de la démarche PEAM

1. Introduction	188
1.1. <i>La validation d'une démarche</i>	189
1.2. <i>Méthodes et outils de validation d'une démarche</i>	190
2. Troisième expérimentation	191
2.1. <i>Contributions et hypothèses de recherche associées</i>	191
2.2. <i>Méthodes et techniques</i>	192
2.2.1. Contexte de l'approche expérimentale	192
2.2.2. Déploiement de l'approche expérimentale	194
2.3. <i>Présentations des résultats</i>	196
2.3.1. Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM	197
2.3.2. Questionnaire sur le retour d'expériences de la démarche PEAM	202
3. Discussion	205
3.1. <i>Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM</i>	206
3.2. <i>Questionnaire sur le retour d'expériences de la démarche PEAM</i>	209
4. Synthèse de la discussion	212
5. Conclusion et synthèse du chapitre	213

1. Introduction

Le chapitre 1 a mis en évidence que les acteurs-métiers en maintenabilité ont une réelle volonté de prendre en compte le facteur humain à travers l'ergonomie mais ils ne l'étudient que très partiellement à travers sa composante « physique ». Ils ne tiennent pas compte des composantes cognitives et organisationnelles pourtant indispensables à toutes approches et analyses ergonomiques (IEA, 2000). Egalement, le chapitre 2 nous a amenés à observer que le département de la maintenabilité possède des outils de simulation communs aux ergonomes tels que les mannequins numériques, la réalité virtuelle ou encore les maquettes physiques. Ces outils se révèlent efficaces pour réaliser des analyses ergonomiques durant les étapes du processus de conception et plus particulièrement celles dédiées à la maintenabilité. Nous avons alors émis l'hypothèse que les outils de simulation pouvaient être un support d'aide pour mieux intégrer le facteur humain par des non spécialistes en ergonomie dans le département de la maintenabilité, à condition que ces outils de simulation soient déployés en suivant un protocole dédié aux approches du facteur humain et qu'ils soient compatibles avec leurs pratiques et métiers.

Au travers des deux premiers chapitres nous avons ainsi mis en avant la nécessité pour l'acteur-métier, qu'il soit ingénieur ou technicien en maintenabilité, de mieux utiliser les outils de simulation, qu'ils soient digitaux ou physiques, à des fins d'intégration du facteur humain. Le mannequin numérique (associé au modeleur, c'est-à-dire l'outil de conception assisté par ordinateur), la réalité virtuelle et la maquette physique sont, en effet, des outils qui se révèlent efficaces pour réaliser des approches et analyses ergonomiques des situations de travail liées à la maintenance des aéronefs. Cependant, sans connaissances spécifiques en ergonomie, leur usage n'est pas optimisé et leur potentiel n'est pas totalement exploité (Pontonnier et al., 2014 ; Bernard et al., 2018). Nous nous sommes ainsi proposés de développer une démarche support pour aider les acteurs-métiers en maintenabilité à mieux utiliser les outils de simulation pour mieux intégrer le facteur humain dans les analyses de maintenabilité. Cette démarche a été construite en accord avec un groupe projet composé d'un expert en maintenabilité du département concerné, et de deux spécialistes en facteur humain du laboratoire partenaire de cette recherche. Cette démarche s'appuie sur les pratiques actuelles déjà connues et maîtrisées de la part de l'ensemble des acteurs-métiers. Nous avons appelé cette démarche PEAM (Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability) et son objectif est d'aider les acteurs-métiers en maintenabilités à mieux intégrer le facteur humain dans les analyses de maintenabilité, avec le support des outils de simulation qu'ils utilisent déjà à des fins de conception et design. Nous nous sommes également appuyés sur les travaux de la littérature montrant que des nouvelles démarches, pour être acceptées et utilisées auprès de non spécialistes en ergonomie, doivent se construire de manière simple, intuitive, n'imposant pas de formation longue ni de connaissances spécifiques (Barcenilla & Bastien, 2009).

Ainsi, à travers la nouvelle démarche PEAM, l'acteur-métier en maintenabilité peut sélectionner les outils de simulation les plus adaptés (en fonction de l'étape du processus de conception, de la zone de travail sur l'hélicoptère et des indicateurs en facteur humain à étudier), il peut aussi préparer les outils de simulation à des fins d'études portant sur le facteur humain et enfin attribuer

un score aux principaux indicateurs spécifiques pouvant toucher la sécurité, les gestes et postures, les efforts ou encore le champ visuel.

L'objectif du présent chapitre 4 vise maintenant à mettre en place une approche expérimentale afin de valider cette nouvelle démarche et observer son efficacité. Cette expérimentation vérifiera si la démarche PEAM permet aux acteurs-métiers de la maintenabilité de mieux intégrer le facteur humain en s'appuyant davantage sur les outils de simulation qu'ils connaissent déjà à des fins d'analyses en design et en conception. Nous allons donc essayer de valider cette nouvelle démarche en l'intégrant au département maintenabilité de l'industriel aéronautique dans lequel nous effectuons nos travaux de recherche. Cette validation est d'autant plus nécessaire qu'elle doit nous permettre de confirmer ou d'infirmer l'axe de recherche initial, émanant des chapitres 1 et 2, sur l'amélioration de l'usage des outils de simulation pour mieux intégrer le facteur humain dans les étapes de conception de la maintenabilité. Pour réaliser cette analyse, nous présentons dans ce chapitre une expérimentation visant à vérifier si le facteur humain est mieux intégré SANS ou AVEC le déploiement de la démarche PEAM. Nous pourrions ainsi connaître les limites et les points forts de la démarche afin de proposer des axes d'amélioration. Dans un premier temps, nous allons détailler un état de l'art sur les différents critères d'analyses existants permettant de valider une nouvelle démarche. Puis nous détaillerons le protocole expérimental déployé chez notre industriel aéronautique pilote avec les résultats et les conclusions associés.

1.1. La validation d'une démarche

Le déploiement de la démarche proposée doit permettre de montrer que le facteur humain est mieux pris en compte dans les analyses de maintenabilité. Nous souhaitons alors valider la démarche PEAM. Cette validation est importante puisqu'elle doit démontrer, résultats à l'appui, qu'une démarche, une procédure, un procédé ou une activité conduit effectivement aux résultats escomptés (Lambert, 2013). Cette notion de validation intègre celle de l'efficacité qui se définit comme « le caractère de ce qui est efficace. C'est la capacité d'obtenir le résultat souhaité ou attendu, d'atteindre l'objectif fixé. » (Toupie, 2018). Egalement, Gilbert, 1980, inclut la notion d'efficacité dans un axe objectifs-résultats. Il voit l'efficacité comme relative à l'utilisation des moyens pour obtenir des résultats donnés dans le cadre d'objectifs fixés ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs. Dans notre cas, les moyens sont la démarche PEAM avec sa méthodologie, et son outil informatique Excel, avec pour objectif attendu une meilleure intégration du facteur humain par une utilisation des outils de simulation en adéquation avec les approches ergonomiques. Le développement de démarches, de procédures et d'outils nouveaux n'est pas récent en ergonomie. Il y a eu depuis les années 1990 une croissance dans le développement et la diffusion de démarches incluant des procédures et des outils permettant d'évaluer les risques physiques et psychosociaux au travail auxquels nous avons nous-même participé (Ferguson & Marras, 1997 ; Marras et al., 1999, Da Costa & Vieira, 2010 ; Vignais, Bernard, Touvenot, Sagot, 2017). Toutes ces études ont pour point commun la volonté de valider les nouvelles démarches proposées en évaluant leur efficacité, notamment en les testant sur le terrain, dans un contexte d'études réalistes, les confrontant ainsi avec les résultats théoriques.

1.2. Méthodes et outils de validation d'une démarche

Afin de valider de nouvelles démarches, la littérature permet d'observer plusieurs méthodes. Plus particulièrement, nous pouvons en retenir deux : (1) les études comparatives avant et après l'intégration de nouvelles démarches (Plantard et al., 2017 ; Gallagher et al., 2017) (2) les études de retours d'expériences des utilisateurs après l'intégration de nouvelles démarches (Lu et al., 2015 ; Lallemand & Gronier, 2018).

Les études comparatives sont nombreuses, nous donnons ici quelques exemples. L'étude de David et al, 2008, détaille le développement et la validation d'une nouvelle démarche pour l'étude et la prévention durable des troubles musculo-squelettiques. Nous observons à la fois un déploiement de la démarche sur le terrain, auprès d'experts en ergonomie et de non experts. Cette approche a pour but de montrer s'il existe une différence significative entre les résultats des analyses menées par les experts et les non experts. Dans le même temps, un questionnaire est diffusé afin de recueillir les retours d'expériences de chaque sondé.

Une autre étude a permis de valider une nouvelle méthode d'évaluation ergonomique en utilisant les technologies de capture de mouvements par Kinect, c'est-à-dire sans capteur placé sur l'opérateur (Plantard et al., 2017). Cette technologie semble très utile dans des environnements de travail encombrés où la captation vidéo avec prise de repères sur des marqueurs corporels est complexe. Ainsi, pour valider la méthode, cette étude compare des données théoriques de scores RULA (McAtamne & Corlett, 1993) liées à une analyse ergonomique classique (observations vidéo et annotations papier) et à une analyse ergonomique réalisée par des captures de mouvements. A chaque fois, ces études sont menées par des spécialistes en ergonomie. La comparaison montre clairement que la nouvelle méthode donne des scores cohérents aux valeurs théoriques, alors que l'acquisition des scores RULA se fait en direct et donc sans post-traitement. Une autre étude à laquelle nous avons participé, a également développé une approche similaire (Vignais et al., 2017).

L'analyse de questionnaires est également assez présente dans la littérature. Une méthode couramment déployée pour valider une démarche, est d'évaluer le niveau de satisfaction des utilisateurs, notamment à travers un questionnaire (Gauzente, 2000 ; Klusmann et al, 2017). De nombreuses méthodes existent pour réaliser des questionnaires de satisfaction et recueillir les retours utilisateurs (Lallemand & Gronier, 2018). Cependant, un questionnaire exprime seulement une tendance de la part d'une population test, relevant ainsi davantage d'une validation subjective que d'une validation réellement objective. Dans son étude, Gauzente (2000) fait la corrélation entre indicateurs subjectifs et objectifs. En effet, il exprime la nécessité d'étudier des résultats provenant aussi bien d'interviews (approche subjective) que d'observations terrain (approche objective). L'approche subjective se veut alors complémentaire de l'approche objective (Bergouignan, 2016), un lien qui se rendrait presque systématique et indissociable pour être complet dans une démarche ergonomique. Les méthodes permettant de recueillir le retour d'expériences doivent pouvoir s'appuyer sur des évaluations objectives où les résultats proviennent directement de mesures objectives. Dans notre cas, où nous sommes directement intégrés au sein même de notre entreprise aéronautique pilote, il est possible de réaliser aussi bien une observation réelle de l'activité de

maintenabilité relevant donc d'une évaluation objective que du retour d'expériences des utilisateurs de la nouvelle démarche PEAM, relevant donc d'une observation plus subjective.

Ainsi, dans la suite de ce chapitre, nous allons établir une approche expérimentale ayant pour objectif d'étudier l'intégration du facteur humain avant et après la diffusion de la démarche PEAM. Egalement, nous recueillerons le retour d'expériences des utilisateurs de la démarche PEAM. Rappelons aussi que la démarche PEAM comporte un processus et un outil informatique aidant l'acteur-métier à déployer la nouvelle démarche.

Ainsi, la validation de la démarche PEAM se divisera en deux approches :

- **Approche objective** : observation d'études relatives au facteur humain pour lesquelles des résultats directs pourront être observés (étape du processus de conception, nombre d'indicateurs ergonomiques, type d'outils de simulation). Cette approche permet de comparer des projets avant et après la diffusion de la démarche PEAM ;
- **Approche subjective** : questionnaire diffusé auprès des utilisateurs de la nouvelle démarche PEAM. Cette approche permet de recueillir le ressenti de chaque acteur-métier pour chaque utilisation de PEAM. Egalement, ils peuvent s'exprimer verbalement ou par écrit concernant les limites et avantages de l'outil proposé.

2. Troisième expérimentation

2.1. Contributions et hypothèses de recherche associées

Afin de valider et de connaître l'efficacité de notre nouvelle démarche, il a été nécessaire de l'évaluer au sein de notre entreprise pilote dans laquelle nous avons réalisé nos observations précédentes dans le cadre des chapitres 1 et 2. Ainsi, nous restons dans un cadre industriel, toujours au sein du département de maintenabilité de notre entreprise pilote, avec les mêmes acteurs-métiers. Les projets industriels doivent également être représentatifs, voire au moins très indicatifs, de ce que font, au quotidien, les acteurs-métiers.

La quatrième et dernière contribution peut ainsi s'exprimer :

C4 : Valider la démarche PEAM proposée au sein du département de maintenabilité de notre industriel aéronautique pilote en vue de mieux intégrer le facteur humain dans leurs pratiques et métiers de tous les jours.

Pour ce faire, nous avons réalisé une approche expérimentale, comparable à d'autres approches déjà proposées dans les chapitres précédents, visant à bien observer si la nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain à travers les outils de simulation existants et en tenant compte du peu de connaissances que peuvent avoir les acteurs-métiers du département maintenabilité en facteur humain. Nous avons en effet montré, au travers des chapitres 1 et 2, que

les ingénieurs et techniciens de ce département ont peu de connaissances en facteur humain mais essayent, avec l'aide d'outils de simulation qu'ils utilisent déjà à des fins d'analyses techniques, de simuler des situations de travail en maintenance. Cette approche expérimentale doit répondre aux hypothèses H4 et H5 suivantes :

- **H4** : La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité par des non experts en ergonomie.
- **H5** : la nouvelle démarche PEAM se révèle efficace tant dans son exploitation que dans la pertinence des résultats obtenus.

La partie qui suit vise à détailler le plan d'expériences en vue de valider notre démarche.

2.2. Méthodes et techniques

2.2.1. Contexte de l'approche expérimentale

Afin de pouvoir mieux suivre les analyses de maintenabilité dans lesquelles les approches de facteur humain sont conduites sur la base de la nouvelle démarche proposée, nous avons été amenés à bien faire connaître la démarche PEAM à huit acteurs-métiers de la maintenabilité. Ces huit personnes ont été retenues car elles intervenaient dans la tranche de temps de notre évaluation à savoir entre avril 2017 et septembre 2018. Nous retrouvons ainsi un technicien et sept ingénieurs qui sont tous spécialisés en maintenabilité. Ainsi, leur activité principale est de concevoir des situations de travail autour de la future activité de maintenance des hélicoptères afin de proposer des solutions techniques pour améliorer l'architecture des hélicoptères, développer des outillages de maintenance et également proposer des procédures ou des séquences de travail pour accompagner l'opérateur de maintenance. L'âge moyen est de 31,4 ans ($\pm 6,8$ ans) et leur ancienneté dans le département de la maintenabilité est de 7,9 ans ($\pm 5,6$ ans). Pour 7 d'entre eux, la formation de base provient d'écoles d'ingénieurs en mécanique française et pour le technicien, d'un Master 2 spécialisé en maintenance aéronautique. Comme déjà évoqué, aucun individu sondé n'a déjà suivi une formation en ergonomie. Le tableau 31 qui suit résume les caractéristiques biométriques des sujets retenus.

Tableau 31 : Caractéristiques de chaque acteur-métier du département maintenabilité.

Sujet	Age (année)	Ancienneté (année)	Formation initiale	Formation en facteur humain-ergonomie
1	24	2	Ingénieur	Non
2	24	2	Ingénieur	Non
3	25	3	Ingénieur	Non
4	28	5	Ingénieur	Non
5	34	9	Ingénieur	Non
6	38	13	Ingénieur	Non
7	39	15	Technicien	Non
8	39	14	Ingénieur	Non

Egalement, nous avons réparti le temps d'observation sur 16 mois afin d'analyser ou étudier des approches en facteur humain caractérisées d'une part, par leurs nombres et d'autre part, par leurs diversités. Ces études ont été faites à partir des outils de simulation recensés et discutés dans notre chapitre précédent et touchant le modelleur 3D (n'intégrant pas le mannequin numérique), le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique. De plus, sur cette période, il a été possible d'observer des études en facteur humain sur l'ensemble du processus de conception en maintenabilité. Nous rappelons que les étapes ont été définies sous cinq grandes phases dans le chapitre 3. La phase 1 correspond aux étapes préliminaires, sans niveau de détails élevé sur la maquette numérique alors que l'étape 5 relève d'une architecture quasi définitive sur tous les outils de simulation. La figure 57 rappelle l'ensemble des phases composant le processus suivi.

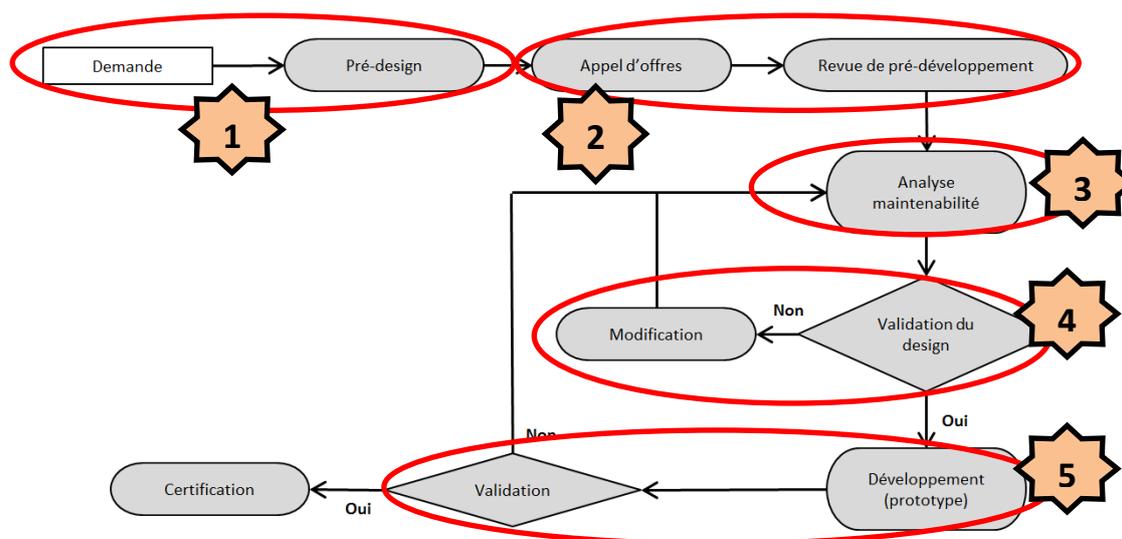


Figure 57 : Zonage du processus de conception réalisée dans le cadre du développement de l'outil PEAM, rappel du chapitre 3.

Nous avons pu observer, d'avril 2017 à décembre 2017, les travaux conduits par les acteurs-métiers relatifs à la prise en compte du facteur humain SANS support de la nouvelle démarche PEAM proposée. De janvier 2018 à septembre 2018 nous avons également observé des travaux relatifs à la prise en compte du facteur humain toujours conduits par nos acteurs métiers, les mêmes, mais cette fois AVEC le support méthodologique de la démarche PEAM proposée. Les approches conduites, afin d'être comparables, ont dû être assez proches dans le temps sur l'ensemble des 16 mois d'observation. Le contexte industriel n'a pas permis de refaire des analyses avec la démarche PEAM sur les mêmes situations de travail réalisées avant l'intégration de PEAM. C'est la raison pour laquelle, nous avons focalisé nos observations sur des zones de travail et des hélicoptères similaires et donc comparables dans nos deux cas de figure. De plus, les opérations de maintenance, en termes de durée, d'efforts, d'outillages et de complexité sont réellement comparables, même si certaines zones n'ont pas pu toujours être exactement identiques. A titre d'exemple, la tâche de maintenance réalisée sur le radome (avec PEAM) est effectuée en position debout avec un champ de vision limité et une accessibilité pour les avant-bras dégradée, conditions similaires pour la tâche réalisée sur le fuselage intermédiaire (sans PEAM). Si les tâches de maintenance restent nombreuses sur le plancher mécanique c'est que le ou les moteurs y sont installés ainsi que la boîte de transmission principale (lien entre fuselage et rotor). Ces parties étant plus critiques, les tâches de maintenance y sont récurrentes et très nombreuses. Egalement, nous

avons dissocié les accessibilités vers et autour des zones de travail par les accessibilités externes et internes (détaillé en chapitre 3). Le tableau 32 expose ces exigences tout en respectant leur cadre de confidentialité.

Tableau 32 : Enumération des tâches de maintenance sur les parties techniques, réalisées sans et avec la démarche PEAM pendant la période de l'expérimentation, d'avril 2017 à septembre 2018 (accessibilité extérieure et intérieure correspond à la maintenance réalisée depuis l'extérieur ou depuis l'intérieur de l'hélicoptère).

	Zone technique	Sans PEAM Approche du facteur humain (Effectif : N)	Avec PEAM Approche du facteur humain (Effectif : N)
Accessibilité extérieure	Radome	0	1
	Fuselage (Marchepieds/poignées)	0	0
	Fuselage (Trappe)	4	4
	Poutre de queue	1	1
	Rotor anti-couple	2	6
	Sous-barque	0	0
	Plancher mécanique	21	28
Accessibilité intérieure	Cockpit	0	0
	Cabine	1	0
	Fuselage intermédiaire	1	0
	Plancher mécanique	4	4
	Poutre de queue	0	0
	Total	34	44

Il convient également de préciser qu'entre les deux périodes de huit mois, soit sur une semaine, en janvier 2018, chacun des huit utilisateurs a pris part à une formation afin de leur fournir toutes les explications nécessaires sur la démarche PEAM, sa logique, son contenu, son originalité,... et sur l'outil informatique associé, qui reste un outil d'aide à la mise en place de PEAM. A l'issue de cette formation, les acteurs-métiers se sont vus remettre un guide sous format numérique résumant les points évoqués pendant la formation incluant un format synthétique de la démarche (annexe 3).

2.2.2. Déploiement de l'approche expérimentale

Afin de valider la démarche PEAM, nous mettons en place une approche expérimentale basée sur la diffusion d'un questionnaire qui se compose en trois grandes parties. Nous proposons de détailler les objectifs de chacune d'elles :

- **Partie 1 : renseignements sur le sujet interrogé.** Cette partie se concentre sur la demande d'informations générales au travers de trois questions autour de l'âge, sur le rôle dans le département maintenabilité et savoir si l'individu a déjà suivi une formation en ergonomie.
- **Partie 2 : renseignements sur le contexte des analyses du facteur humain conduites, avec ou sans le support de la démarche PEAM.** Cette partie vise donc à étudier l'hypothèse H5 à savoir « La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain ». Le questionnaire a donc été diffusé sur la période d'avril 2017 à septembre 2018 pour couvrir

les deux périodes où les approches ergonomiques ont pu être réalisées sans PEAM puis avec PEAM. Ce questionnaire permet de recueillir toutes les informations relatives aux approches ergonomiques conduites au cours de chaque phase d'étude du processus de conception, là où les outils de simulation sont ou ne sont pas utilisés. Ces éléments et notions que l'on retrouve dans la démarche PEAM sont donc essentiels. En remplissant ces questionnaires avant et après le déploiement de PEAM, nous pouvons alors comparer les résultats obtenus au cours des deux périodes observées.

➤ **Partie 3 : renseignements sur le retour d'expérience de la démarche PEAM.** La troisième et dernière partie correspond à l'évaluation de PEAM et à son impact sur le processus de conception. En accord avec le groupe projet et la littérature (Lambert, 2013 ; Marras et al., 1999, Da Costa & Vieira, 2010 ; Vignais et al., 2017), nous avons retenu quatre niveaux :

1. Le niveau d'efficacité, c'est-à-dire si la démarche PEAM a permis d'atteindre l'objectif initial, quantifier les indicateurs ergonomiques de la situation de travail étudiée en ayant correctement utilisé les bons outils de simulation au bon moment. L'efficacité est notée sur une échelle de 1 à 5 en s'inspirant de l'échelle de Likert (Allen & Seaman, 2007), 1 étant défini comme peu efficace pour le projet, 5 étant considéré comme très efficace ;
2. Le niveau de clarté de la démarche PEAM sur une échelle également de 1 à 5, 1 étant défini comme peu clair et peu intuitif, 5 étant très clair et très intuitif ;
3. L'impact sur le projet, notamment vis-à-vis de l'acceptation des recommandations, qui découle de PEAM face aux critères mécaniques. Ce critère est également évalué de 1 à 5, 1 étant un impact nul, sans prise en compte des exigences ergonomiques, 5 étant une acceptation totale des recommandations avec modifications de l'architecture et/ou du développement d'un outillage dédié à la maintenance pour faciliter la tâche de l'opérateur et/ou une procédure de maintenance spécifique permettant d'aider ce dernier ;
4. Le temps nécessaire pour déployer la démarche PEAM a été demandé. Cette donnée doit permettre de voir si l'acteur-métier réduit son temps d'analyse avec l'accoutumance de la démarche PEAM. L'évaluation du temps ne prend pas en compte les temps de préparation des maquettes numériques (mannequin ou réalité virtuelle) et des maquettes physiques. En effet, ces temps dépendent d'autres départements du bureau d'études rendant le suivi incertain et peu précis.

Des remarques écrites de la part des utilisateurs de PEAM pourront également permettre de récolter leurs retours d'expériences sur les points de détails qui n'ont pas été anticipés ou observés. Toutes seront lues et prises en compte pour assurer une amélioration de la démarche PEAM.

Contrairement au premier questionnaire, réalisé en chapitre 1, qui a été conçu pour une passation semi-directive, c'est-à-dire avec un échange verbal entre le sondé et le rédacteur du questionnaire, il a été choisi de concevoir un questionnaire qualifié de plus « classique », laissant en autonomie l'acteur-métier. En effet, l'évaluation de la démarche PEAM doit se faire sans influence extérieure, le jugement propre de l'utilisateur étant l'une des seules voies possible pour objectiver une validation (Bradburn et al., 2004). Ce questionnaire a été construit pour extraire des données quantitatives exploitables pour un traitement statistique, en effet, selon Fenneteau, 2015, les interviews seules permettent uniquement un retour d'expérience qualitatif. Egalement, le questionnaire étant répétitif, chaque sondé devant remplir une évaluation pour chaque usage de PEAM, il est très important qu'il soit court. Ce questionnaire a donc été conçu pour être rempli en trois minutes. Un expert en ergonomie (ergonome issu du département de conception des équipements de bord), un ergonome du laboratoire partenaire de cette recherche et un expert en maintenabilité ont examiné et révisé le questionnaire. Ils ont évalué la validité apparente, la validité du contenu et la validité de construction pour en assurer la compréhensibilité et la clarté (Singh, 2017). Notons aussi, qu'avant le déploiement de l'outil et du questionnaire d'évaluation, plusieurs questionnaires martyres ont été testés sur deux personnes indépendantes du département pour ne pas biaiser les futurs résultats. Nous avons ainsi pu optimiser la compréhension des questions pour les rendre claires, intuitives et ainsi ne pas influencer la réponse du sondé. Egalement, la donnée quantitative n'est pas la seule voie possible pour évaluer une démarche proposée, il est en effet important de la corrélérer avec des données qualitatives. C'est pourquoi chaque approche ergonomique conduite est connue et suivie par l'évaluateur, sans aucune intervention de sa part. A la fin de chaque projet, induisant une ou plusieurs utilisations de la démarche PEAM, et une fois le questionnaire rempli, il y eu un échange entre l'évaluateur et l'acteur-métier pour faire un bilan et recueillir verbalement les retours d'expériences sur le déploiement de la démarche PEAM.

2.3. Présentations des résultats

Afin d'analyser nos résultats en cohérences avec nos hypothèses de départ nous avons souhaité les diviser en deux grandes catégories :

1. Premièrement, nous analysons le contexte d'usage de l'outil PEAM en le comparant aux données récoltées avant sa diffusion.
2. Dans un deuxième temps, nous étudions les retours d'expériences de l'usage de l'outil PEAM.

2.3.1. Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM

Un premier comparatif statistique peut être détaillé avec les phases du processus de conception en maintenabilité dans lesquelles ont été menées des analyses de maintenabilité incluant une approche facteur humain, et donc avec le déploiement de la démarche PEAM.

Sans le déploiement de PEAM (période d’avril 2017 à décembre 2017), il ressort sur la base des analyses statistiques conduites (Anova à 2 niveaux), tous acteurs-métiers confondus, qu’un effet phase existe concernant la moyenne du nombre d’outils de simulation utilisés, cet effet ressortant uniquement à cause de la phase 2 ($p \leq 0.001$) puisque les phases 1, 3, 4 et 5 ne présentent pas de différences significatives entre elles (Figure 58).

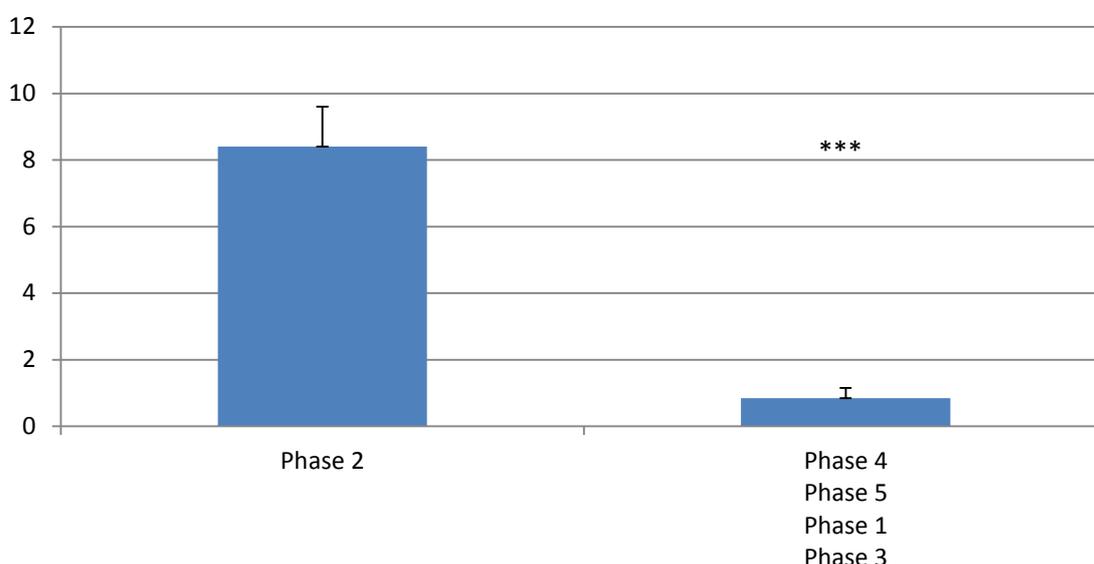


Figure 58 : Sans le déploiement de la démarche PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne ($\pm ET$) du nombre de fois où les outils de simulation ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus. Il existe un effet phase entre la phase 2 et les phases 1,3,4,5 pour lesquelles, il n’y pas de différence significative entre elles, concernant l’usage des outils de simulation. (***) : $p \leq 0.001$).

Avec le déploiement de PEAM (période de janvier 2018 à septembre 2018), il ressort sur la base des analyses statistiques conduites (Anova à 2 niveaux), toujours tous acteurs-métiers confondus, qu’il n’y a pas d’effet phase concernant la moyenne du nombre d’outils de simulation utilisé même si la phase 2 reste la phase où les outils de simulation sont de nouveaux les plus utilisés avec une moyenne de 4,4 ($\pm 0,9$) fois. Nous remarquons que cette valeur est deux fois moins importante que précédemment alors que le nombre de projets étudiés est plus élevé, 34 sans l’outil PEAM contre 44 avec l’outil PEAM (Figure 59).

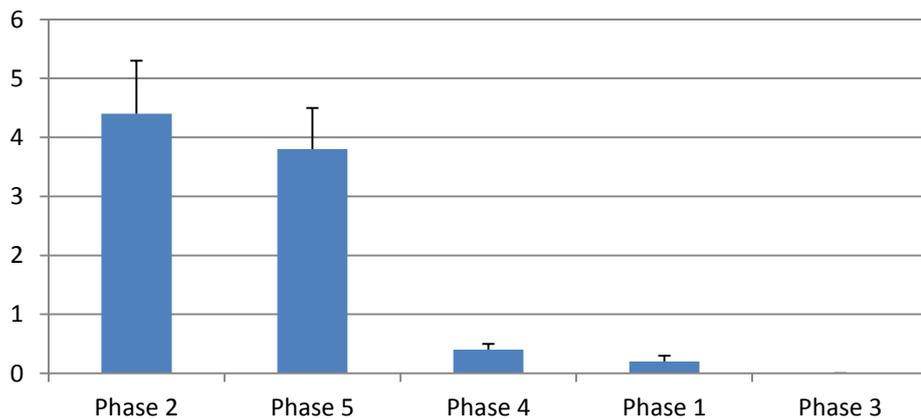


Figure 59 : Avec le déploiement de la démarche PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (\pm ET) du nombre de fois où les outils de simulation ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus. Il n'y pas de différence significative entre les phases (NS).

Nous proposons maintenant d'étudier les écarts existants entre les phases du processus de conception et les outils de simulation utilisés, sans et avec le déploiement de PEAM, à l'aide du test de Fisher pour compléter notre analyse. Le tableau 33 présente les résultats, pour chaque phase d'étude du processus, nous pouvons lire le pourcentage d'utilisation de chaque outil de simulation. Par exemple, en phase 2 sans PEAM, le mannequin numérique a été utilisé 16 fois sur 21 (soit 76,2%) afin de pouvoir conduire des analyses de maintenabilité intégrant une approche facteur humain. La phase 3 n'est pas comparée puisque, sur la période de 16 mois, aucune analyse de maintenabilité intégrant une approche facteur humain n'a été réalisée.

Pour les phases 1, 2, 4 et 5 nous remarquons des écarts très significatifs entre le non déploiement et le déploiement de la démarche PEAM. Nous observons également que pour les phases 2, 4 et 5 uniquement sans PEAM, certaines approches de facteur humain sont réalisées sans aucun outil de simulation. Egalement, si nous regardons le cumul des pourcentages pour chaque phase avec et sans PEAM, nous observons des valeurs dépassant les 100% uniquement dans les phases sans PEAM (phase 1, 2, 4 et 5) exprimant l'utilisation de plusieurs outils de simulation pour une même analyse.

Par exemple, en phase 2, sans la démarche PEAM, trois outils ont été majoritairement utilisés (modeleur, mannequin numérique et maquette physique). Le cumul des pourcentages atteint 184.7% ce qui implique que pour certaines approches de facteur humain, plusieurs outils de simulation ont été utilisés. Or, avec le déploiement de PEAM, nous observons deux effets en phase 2 :

- Les outils de simulation préconisés pour la phase 2 dans la démarche PEAM ont été utilisés (mannequin numérique et réalité virtuelle). Notons un autre exemple en phase 5 où la maquette physique préconisée dans la démarche PEAM atteint un score d'usage de 94.7% contre 75% sans PEAM,
- Le score cumulé atteint 100% induisant que chaque analyse de maintenabilité intégrant une approche facteur humain n'a eu en support qu'un seul outil de simulation. Cette observation se répète pour les phases 1, 4 et 5.

Tableau 33 : Ecart de l'utilisation entre chaque outil de simulation (aucun outil, modeleur, mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique), SANS et AVEC la démarche PEAM, dans chacune des phases du processus. Le test de Fisher a été utilisé pour mesurer l'écart avec et sans PEAM (N=8 ; ** p<0.01 ; ***p<0.001).

		Aucun outil (%)	Modeleur (%)	Mannequin numérique (%)	Réalité virtuelle (%)	Maquette physique (%)	Ecart entre PEAM ou non
Phase 1	Sans PEAM	0	100	100	0	0	**
	Avec PEAM	0	0	100	0	0	
Phase 2	Sans PEAM	14,3	61,9	76,2	0	47,6	***
	Avec PEAM	0	0	54,6	45,4	0	
Phase 3	Sans PEAM	0	0	0	0	0	NS
	Avec PEAM	0	0	0	0	0	
Phase 4	Sans PEAM	57,1	14,3	14,3	0	28,6	***
	Avec PEAM	0	0	50	0	50	
Phase 5	Sans PEAM	25	25	0	0	75	***
	Avec PEAM	0	0	5,3	0	94,7	

Maintenant, nous souhaitons observer s'il existe un effet phase en fonction des indicateurs ergonomiques utilisés, avec et sans PEAM. Comme nous l'avons détaillé dans les chapitres 1 et 2, certains indicateurs ergonomiques sont étudiés mais sans méthode claire et objective. Le chapitre 3 a, quant à lui, préconisé des indicateurs ergonomiques à étudier en fonction des outils de simulation.

Sans le déploiement de PEAM (période d'avril 2017 à décembre 2017), il ressort sur la base des analyses statistiques conduites (Anova à 2 niveaux), tous acteurs-métiers confondus, qu'un effet phase existe concernant la moyenne du nombre d'indicateurs ergonomiques utilisés, mais uniquement à cause de la phase 2 (p<0.001) puisque les phases 1, 3, 4 et 5 ne présentent pas de différence significative entre elles (Figure 60). En effet, en phase 2, certains indicateurs sont systématiquement étudiés, comme la posture (20 fois) ou le champ visuel (14 fois) contre en moyenne 2 et 1 fois pour les autres phases 1, 3, 4 et 5.

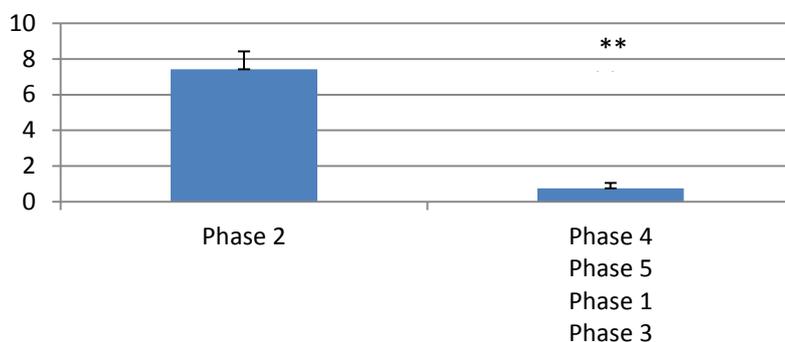


Figure 60 : SANS l'usage de l'outil PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (±ET) du nombre de fois où les indicateurs ergonomiques ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus (** : p<0.01).

Avec le déploiement de PEAM, il ressort sur la base des analyses statistiques conduites (Anova à 2 niveaux) que les phases du processus de conception diffèrent significativement selon l'utilisation des outils de simulation ($p \leq 0.001$). La phase 2 reste la phase où les indicateurs ergonomiques sont les plus utilisés avec 18,6 ($\pm 1,4$) fois. La phase 5 ressort également avec une moyenne d'utilisation de 13 ($\pm 1,1$) fois. Les phases 1, 3 et 4 sont regroupées avec une moyenne d'utilisation des indicateurs ergonomiques de 0,5 ($\pm 0,2$) fois. La figure 61 qui suit illustre ce résultat.

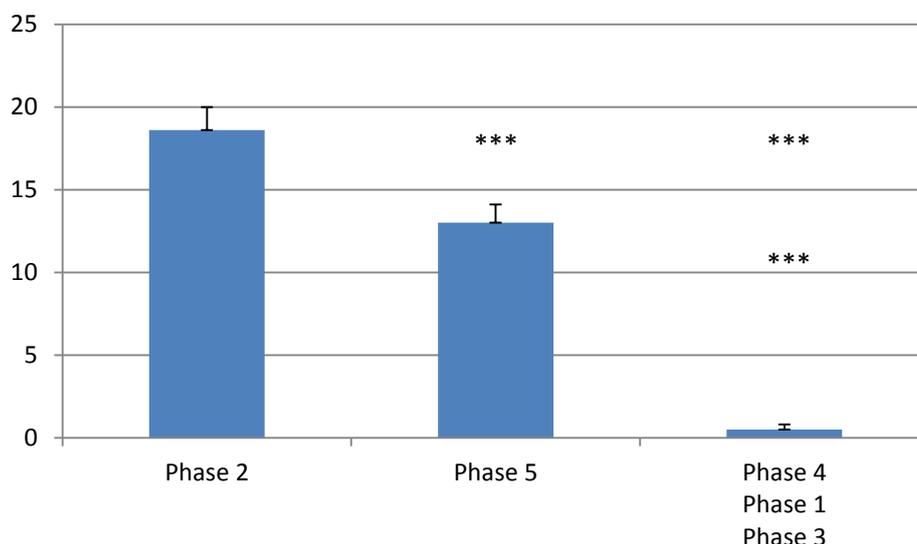


Figure 61 : Avec l'usage de l'outil PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne ($\pm ET$) du nombre de fois où les indicateurs ergonomiques ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus (***) : $p \leq 0.001$.

Pour mieux comprendre les écarts, nous nous sommes proposés d'étudier la synergie existante entre les phases du processus et les indicateurs ergonomiques utilisés à l'aide du test de Fisher. Le tableau 34 présente les résultats. Pour chaque phase, nous pouvons lire le pourcentage d'utilisation de chaque indicateur ergonomique. Par exemple, en phase 2 sans PEAM, l'effort a été évalué 11 fois sur 21 approches du facteur humain réalisées dans cette phase (soit 52,4%). La phase 3 n'est pas comparée puisque aucun acteur-métier n'a réalisé d'analyse maintenabilité intégrant une approche du facteur humain au cours de la période d'observation de 16 mois.

Pour les phases 1, 2, 4 et 5, nous remarquons des écarts très significatifs avec et sans le déploiement de PEAM. Avec le déploiement de PEAM, nous observons des scores atteignant 100% pour chacune des phases 1, 2, 4 et 5, c'est-à-dire que certains indicateurs ergonomiques ont été évalués à chaque analyse de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain. La posture est par exemple, avec l'outil PEAM, un indicateur étudié dans toutes les analyses et toutes les phases du processus.

Si nous analysons maintenant le type d'indicateur évalué, nous pouvons observer des différences avec et sans PEAM. Par exemple, en phase 1, sans PEAM, la posture et le champ visuel sont les seuls indicateurs considérés alors qu'avec PEAM l'effort et les collisions s'ajoutent. La charge mentale n'apparaît dans aucune des phases sans PEAM alors qu'avec PEAM elle apparaît dans les phases 2 et 5 atteignant même 73% d'usage pour cette dernière. Nous remarquons cependant que les phases 2 et 5 se détachent. En effet, la phase 2 est la seule phase, avec le déploiement de PEAM, où tous les

indicateurs ergonomiques sont utilisés. Le pourcentage d'usage de l'ensemble des indicateurs ergonomiques est également le plus important des cinq phases avec cinq indicateurs à 100%, c'est-à-dire utilisés pour chaque approche du facteur humain. La phase 5 est quant à elle la phase où l'écart d'usage est le plus important, seulement deux indicateurs sans PEAM (posture et effort) et six indicateurs avec PEAM (posture, effort, champ visuel, sécurité au travail, charge mentale et temps d'exécution).

Tableau 34 : Analyse des écarts des pourcentages d'utilisation des indicateurs ergonomiques au cours de chacune des phases du processus, avec le déploiement ou non de la démarche PEAM. Le test de Fisher a été utilisé pour observer la relation existante avec et sans PEAM (N=8 ; ** p≤0.01 ; ***p≤0.001).

		Posture (%)	Effort (%)	Champ visuel (%)	Collision (%)	Sécurité au travail (%)	Charge mentale (%)	Temps d'exécution (%)	Ecart Avec PEAM ou non
Phase 1	Sans PEAM	100,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	**
	Avec PEAM	100,0	100,0	100,0	100,0	0,0	0,0	0,0	
Phase 2	Sans PEAM	95,2	52,4	66,7	4,8	0,0	0,0	28,6	***
	Avec PEAM	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	45,5	45,5	
Phase 3	Sans PEAM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NS
	Avec PEAM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Phase 4	Sans PEAM	57,1	85,7	28,6	14,3	0,0	0,0	0,0	***
	Avec PEAM	100,0	100,0	50,0	0,0	50,0	0,0	0,0	
Phase 5	Sans PEAM	100,0	25,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	***
	Avec PEAM	100,0	78,9	73,7	0,0	78,9	73,7	73,7	

Nous adoptons maintenant une vue macroscopique dans chacune des phases d'étude du processus de maintenabilité en comparant uniquement le pourcentage d'analyses de maintenabilité incluant une approche du facteur humain réalisée sans et avec le déploiement de la démarche PEAM (figure 62). Nous observons que les phases 1, 2 et 3 ne présentent pas de différence significative du nombre d'analyses incluant une approche du facteur humain. La phase 2 se distingue des autres phases car elle est la phase où la majorité des approches du facteur humain est réalisée, soit en moyenne 56%, avec ou non le déploiement de PEAM, puisque nous n'observons pas de différence significative entre les deux situations. Les phases 4 et 5, quant à elles, présentent des écarts significatifs. En phase 4, le pourcentage d'approche du facteur humain est plus important sans PEAM

(20,6%) qu’avec PEAM (4.6%), l’écart noté demeure significativement différent ($p \leq 0.05$). Par contre, en phase 5 nous observons l’inverse, 11,8% sans PEAM contre 43.2% avec PEAM, et cet écart demeure significatif ($p \leq 0.005$). Nous observons ainsi avec la démarche PEAM, une forte augmentation des analyses ergonomiques réalisées en phase 5, cette dernière, rappelons-le, s’intéresse à la fabrication des prototypes et à la validation avant la certification et la mise en service de l’hélicoptère.

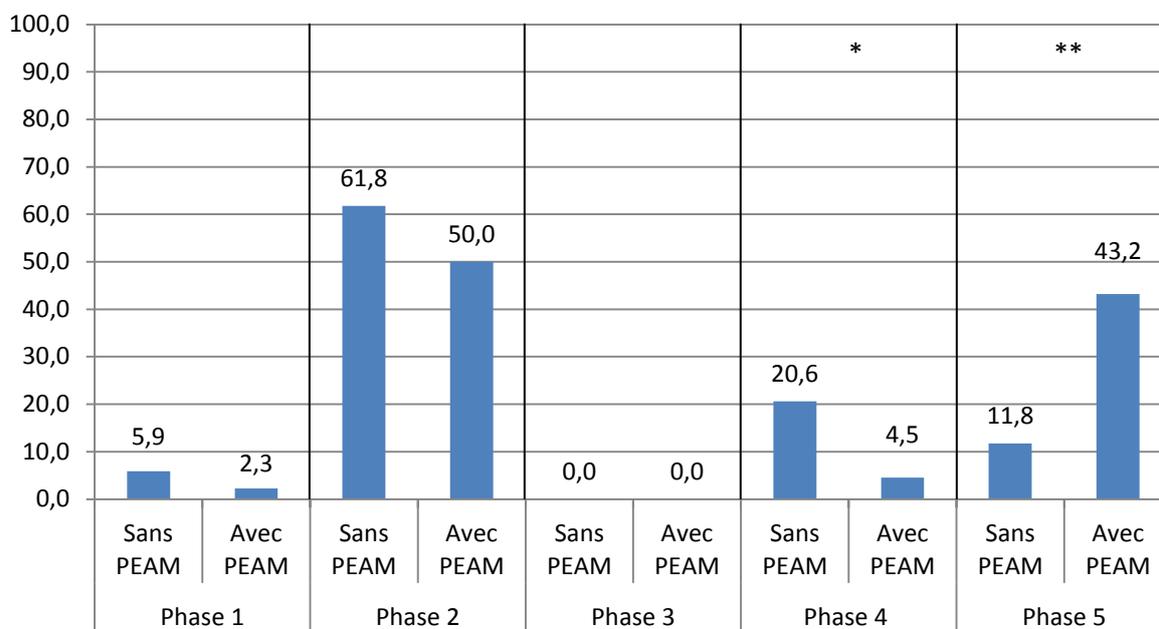


Figure 62 : Pourcentage des analyses de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain réalisées dans chacune des phases du processus de conception, test de Mann-Whitney pour comparer SANS et AVEC le déploiement de la démarche PEAM (N=8, * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.005$).

2.3.2. Questionnaire sur le retour d’expériences de la démarche PEAM

Dans cette partie nous allons étudier les résultats découlant de la deuxième partie du questionnaire appartenant aux retours d’expériences, suite au déploiement de la nouvelle démarche PEAM. Nous rappelons que ce déploiement a été réalisé suite à une formation de 2 heures des huit acteurs-métiers du département maintenabilité participant à l’expérimentation. A l’issue de cette formation, ils ont reçu un guide sous format papier pour leur rappeler l’intérêt et le fonctionnement de chacune des étapes de la démarche PEAM. Egalement, ils ont reçu sous format électronique (fichier Excel) la dernière étape de la démarche PEAM, leur permettant de noter chacun des indicateurs ergonomiques.

Tout d’abord, sur l’ensemble des 44 analyses conduites avec le déploiement de la démarche PEAM, tous acteurs-métiers confondus, le temps nécessaire pour déployer la démarche PEAM est de 22.1 (± 5.6) minutes. Nous rappelons que l’évaluation du temps ne prend pas en compte les temps

de préparation des maquettes numériques (mannequin ou réalité virtuelle) et des maquettes physiques. En effet, ces temps de préparation dépendent d'autres départements du bureau d'études rendant le suivi incertain et peu précis. On peut noter qu'à travers les 44 analyses de maintenabilité où PEAM a été déployée, l'usage des outils de simulation se répartit comme suit : 40% au travers du mannequin, 20% au travers de la réalité virtuelle et 40% sur la maquette physique. Nous observons le temps le plus long lorsque PEAM est déployée à travers la réalité virtuelle (60 minutes) et le temps le plus court à travers la maquette physique (15 minutes).

L'analyse des trois questions déterminant si la démarche PEAM a été efficace, claire (facile d'usage) et pertinente, nous amène à observer qu'il n'y a pas de différence significative entre les trois résultats (test de Friedman, NS), quel que soit l'outil de simulation et tous acteurs-métiers confondus (figure 63). Pour chacun des trois critères, le score moyen se situe à 3.7 (± 0.4) traduisant ainsi que PEAM est aussi efficace que claire mais également qu'elle permet de favoriser le compromis technique.

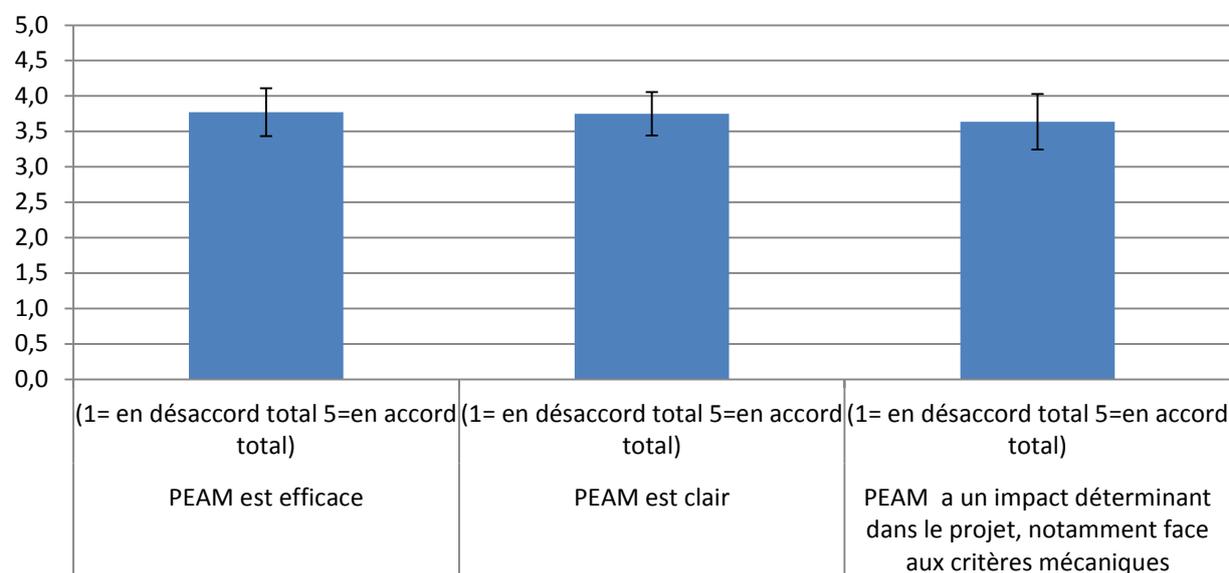


Figure 63 : Notes moyennes (\pm ET) pour chacune des trois questions posées sur l'efficacité, la clarté et la pertinence de la démarche PEAM, tous outils de simulation et acteurs-métiers confondus. Le test statistique conduit (test de Friedman) ne traduit aucune différence significative.

Nous analysons maintenant plus en détails s'il existe un effet phase pour chacune des trois questions posées. Tout d'abord, il ressort sur la base des analyses statistiques conduites (Anova à 2 niveaux) que les phases du processus de conception ne diffèrent pas significativement en fonction de l'efficacité de la démarche PEAM ($p=NS$). En effet, sur l'ensemble des phases, le niveau d'efficacité est en moyenne de 3,9 ($\pm 0,2$) sur l'échelle d'évaluation de 0 à 5, traduisant une efficacité constante, quelle que soit la phase.

En revanche, pour la clarté de la démarche PEAM, il existe un effet phase puisque l'analyse statistique conduite (Anova à 2 niveaux) montre un écart significatif ($p \leq 0.005$) entre la phase 1 et les phases 2, 4 et 5 qui ne présentent pas d'écarts significatifs entre elles. La figure 64 présente l'ensemble des résultats obtenus.

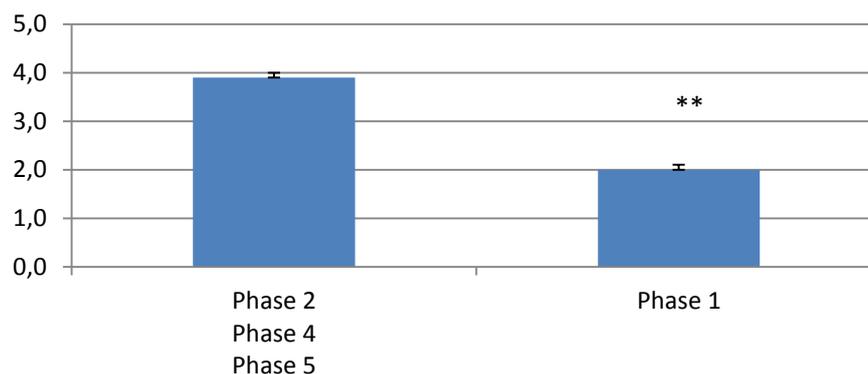


Figure 64 : Notes moyennes du questionnaire (\pm ET) sur la clarté de la démarche PEAM en fonction des phases du processus de maintenabilité, tous acteurs-métiers confondus (** $p \leq 0.005$). 1 étant défini comme peu clair et peu intuitif, 5 étant très clair et très intuitif.

Egalement, nous observons un effet phase en fonction de la note évaluant la pertinence de la démarche PEAM. En effet, l'analyse statistique conduite (Anova à 2 niveaux) montre, encore une fois, un écart significatif ($p \leq 0.05$) entre la phase 1 et les phases 2, 4 et 5 qui ne présentent pas d'écarts significatifs entre elles. La figure 65 présente les résultats

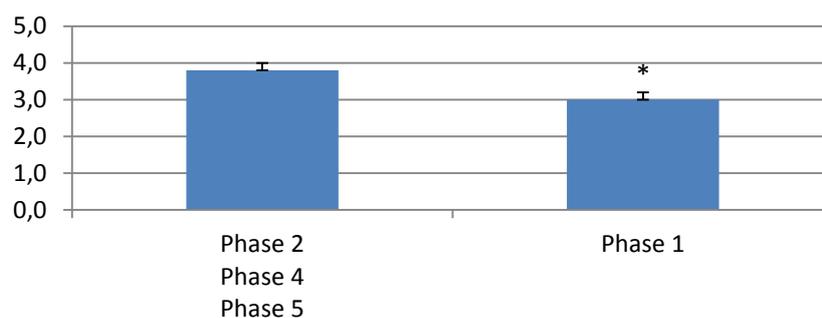


Figure 65 : Notes moyennes du questionnaire (\pm ET) sur la pertinence de la démarche PEAM en fonction des phases du processus de maintenabilité, tous acteurs-métiers confondus (* $p \leq 0.05$). 1 étant un impact nul, sans prise en compte des exigences ergonomiques, 5 étant une acceptation totale des recommandations.

L'échange verbal avec les acteurs-métiers de la maintenabilité ayant déployé la démarche PEAM fait ressortir deux points différents sur lesquels ils ont ressenti quelques difficultés dans son déploiement:

- L'application du logiciel EMMA pour évaluer certains indicateurs dans la démarche PEAM (détaillé en chapitre 3), qui pour rappel est un outil Airbus Group dédié aux approches ergonomiques en chaîne d'assemblage et aux non experts en ergonomie. Son usage est l'une des principales critiques revenant quasi systématiquement sur 95% des analyses de maintenabilité incluant une approche du facteur humain. En effet, les acteurs-métiers ont reproché à la démarche PEAM, qui s'ajoute au processus actuel des analyses de maintenabilité, de devoir utiliser un autre outil que celui proposé par le fichier Excel automatisé. Ainsi, le logiciel EMMA n'a pas été perçu comme un outil utile, les acteur-

métiers souhaitant que la démarche PEAM soit autoporteuse sans devoir déployer d'autres outils.

- Le déploiement de la démarche PEAM a été verbalement critiqué devant certaines situations de travail. Par exemple, l'efficacité de PEAM a obtenu un score de 1 pour une tâche de maintenance à travers le mannequin numérique. L'acteur-métier en maintenabilité a ressenti des difficultés pour percevoir le lien entre les indicateurs ergonomiques proposés et la tâche de maintenance à étudier. L'acteur-métier lui-même a insisté sur la nécessité d'être formé un minimum à la discipline du facteur humain pour tenter de mieux comprendre les situations de travail et utiliser efficacement PEAM.

3. Discussion

Les deux premiers chapitres nous ont montré que les acteurs-métiers en maintenabilité prennent en compte seulement la composante physique de l'ergonomie au dépend de l'ergonomie cognitive et organisationnelle. Egalement, nous avons pu voir que les outils de simulation utilisés classiquement dans les études de maintenabilité (modèles 3D sans mannequin numérique, les mannequins numériques, la réalité virtuelle et les maquettes physiques) sont un moyen existant au sein de l'industrie aéronautique pouvant permettre de réaliser des études en facteur humain. Afin de mieux intégrer le facteur humain dans le département de la maintenabilité une nouvelle démarche a alors été développée, enseignée et diffusée aux acteurs-métiers de ce même département. Cette démarche s'appelle PEAM pour « Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability ».

Afin de valider cette nouvelle démarche, nous avons réalisé une expérimentation sur seize mois. Les huit premiers mois ont permis d'observer la gestion des études en facteur humain conduites classiquement sans la démarche PEAM tout au long du processus de conception dédié à la maintenabilité. Les huit mois suivants ont, quant à eux, permis d'observer la gestion des études en facteur humain avec la démarche PEAM qui s'appuie sur le processus des études de maintenabilité existant, connu et maîtrisé par l'ensemble des acteurs-métiers du département. La discussion qui suit se divise en deux parties, comme pour les résultats. La première partie permet de comparer des analyses de maintenabilité incluant une approche facteur humain conduites sans et avec la démarche PEAM, la deuxième partie vise, quant à elle, à observer le retour d'expériences des utilisateurs de la démarche PEAM.

3.1. Comparaison avant et après le déploiement de la démarche PEAM

Afin de connaître l'impact de la nouvelle méthode et de l'outil PEAM sur les projets et les analyses ergonomiques menées par les acteurs-métiers du département de la maintenabilité, nous avons réalisé une analyse comparative. Huit acteurs-métiers spécialisés en maintenabilité ont réalisé 34 projets sans le déploiement de la nouvelle démarche et 44 projets avec le déploiement de la nouvelle démarche. Nous rappelons que la nouvelle démarche PEAM a pour objectif de mieux intégrer le facteur humain dans les analyses de maintenabilité conduites par les acteurs-métiers de ce même département. Pour ce faire, la démarche propose de choisir les bons outils de simulation en fonction de la phase du processus de conception, d'appliquer un protocole pour chacun de ses outils de simulation à des fins d'études de prise en compte du facteur humain et d'évaluer ainsi la situation de travail future sur la base d'indicateurs ergonomiques tels que la sécurité, les postures, les gestes, les efforts ou encore le champ visuel....Notons que la phase 3 du processus de conception en maintenabilité n'ayant comptabilisée aucune étude, aucune approche du facteur humain avec ou sans PEAM, elle n'a pu être, dès lors, intégrée dans notre analyse.

Tout d'abord, nous avons souhaité analyser le nombre de fois où les outils de simulation (modeleur, mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique) sont utilisés en fonction des phases du processus. Il ressort un effet phase sans PEAM alors qu'avec son déploiement, nous n'observons pas de différence significative entre les phases indiquant que le choix des outils de simulation est homogène. La phase 2 reste la phase où les outils de simulation sont les plus utilisés sans et avec l'application de PEAM. Egalement, nous avons étudié qu'il existe un effet phase en fonction du nombre de fois où les indicateurs ergonomiques sont évalués (postures, efforts, champ visuel, collisions, sécurité au travail, charge mentale et temps d'exécution). Nos résultats montrent que sans et avec la nouvelle approche, le nombre de fois où sont évalués les indicateurs ergonomiques diffère significativement entre les phases. Cependant, la phase 2, sans et avec la nouvelle démarche, reste encore la phase où les indicateurs sont les plus évalués. De plus, avec le déploiement de PEAM, nous remarquons que la phase 5 ressort des autres phases, puisqu'elle devient une phase où l'utilisation des outils de simulation et l'évaluation des indicateurs ergonomiques sont les plus nombreux. Ainsi, les phases 2 et 5 semblent focaliser l'attention des acteurs-métiers en maintenabilité. Cette observation se confirme en ayant une vue macroscopique de notre analyse, en observant uniquement le nombre d'approches du facteur humain mené à travers chacune des phases, sans et avec la nouvelle démarche. La phase 2 et la phase 5 ont notamment vu des changements dans la manière d'intégrer le facteur humain par les acteurs-métiers en maintenabilité. En effet, la phase 2 se distingue des autres phases puisqu'elle est la phase où la majorité des analyses ergonomiques est réalisée sans la nouvelle approche (61.8%) et avec (50%), sans créer d'écarts significatifs. Les phases 4 et 5, quant à elles, présentent des écarts significatifs avec un phénomène particulier : avec la nouvelle démarche le nombre d'analyses de maintenabilité incluant une approche du facteur humain diminue en phase 4 pour augmenter en phase 5.

L'intérêt des acteurs-métiers pour mieux prendre en compte le facteur humain dans les phases 2 et 5 peut s'expliquer par leur enjeu. En effet, la phase 2 est une étape clé sur l'ensemble du processus de conception, notamment en intégrant l'étape de pré-développement. Cette étape est cruciale dans le processus de conception (Blanchard, 2014) car les spécifications techniques d'un hélicoptère sont déterminées et validées dans cette étape en fonction des besoins initiaux du cycle de vie du produit (politique générale et normes associées). Cette observation est cohérente avec celle observée au chapitre I. En effet, nous avons montré que cette étape était la seule sur l'ensemble du processus de conception où, si un acteur-métier effectue une étude du facteur humain, il collabore ensuite avec d'autres départements. La phase 5, quant à elle, rappelons-le, comporte les étapes de développement de prototype et de validation. Ces étapes sont également très importantes puisqu'elles représentent le dernier jalon avant un gel définitif de l'architecture du produit et sa production, en vue de le diffuser sur le marché (Blanchard, 2014). Egalement, en phase 5, la maquette physique atteint un niveau de détails très élevé. Nous pouvons alors expliquer son utilisation par la volonté de l'acteur-métier de s'assurer de la bonne conformité du produit qu'il a conçu et testé dans les phases précédentes. Ajoutons que le manque important de confiance que peut avoir l'acteur-métier sur la simulation en amont est potentiellement dû à l'utilisation des outils de simulation numériques, en particulier la réalité virtuelle. Même si notre nouvelle démarche PEAM propose un protocole pour physicaliser à minima l'environnement réel sur la plate-forme de réalité virtuelle, l'acteur-métier peut toujours avoir le sentiment que l'écart entre le virtuel et le réel est important et donc peu représentatif du terrain. L'étude de Chedmail et al., 2002, a montré que l'opérateur immergé a également des difficultés à faire confiance à l'environnement virtuel par manque d'éléments tangibles. En outre, l'opérateur souhaiterait presque reproduire l'ensemble de l'environnement réel sur la plate-forme de réalité virtuelle.

En observant chaque outil de simulation et chaque indicateur ergonomique phase par phase, avec et sans PEAM, des écarts significatifs apparaissent pour chaque étape. Tout d'abord, sans la nouvelle démarche, pour les phases 2, 4 et 5, nous observons que certaines analyses de maintenabilité incluant une approche du facteur humain n'ont pas été supportées par un outil de simulation. On observe en effet un pourcentage de non utilisation des outils de simulation, allant de 14% (± 0.9) en phase 2 à 57% (± 2.5) en phase 4. Globalement, avec la nouvelle démarche, nous observons un effort de rationalisation dans l'utilisation des outils de simulation sur l'ensemble du processus de conception. Ainsi, nous observons deux effets :

- Les bons outils de simulation ont été utilisés dans chacune des phases en accord avec la nouvelle démarche ;
- Chaque étude relevant du facteur humain n'a eu en support qu'un seul outil de simulation, comme le préconise notre démarche PEAM.

Egalement, pour les indicateurs ergonomiques, avec la nouvelle approche, nous observons deux phénomènes :

- Le nombre d'indicateurs utilisés est plus élevé ;

- Le pourcentage d'utilisation des indicateurs est également plus élevé.

Plus particulièrement, avec la réalité virtuelle et la maquette physique, l'acteur-métier, sans connaissance en facteur humain, analyse bien l'ensemble des composantes de l'ergonomie, à savoir les composantes physiques, organisationnelles et cognitives. Ainsi, sans le déploiement de PEAM, le manque de connaissances en facteur humain mais également le manque de savoir et savoir-faire sur les outils de simulation peut expliquer le faible déploiement des outils de simulation et des indicateurs ergonomiques. L'acteur-métier en maintenabilité ne sachant pas comment un outil de simulation numérique ou physique pourrait l'aider dans son approche du facteur humain peut parfois prendre la décision, en effet, ne pas l'utiliser (Bernard et al., 2017). Par ailleurs, la littérature met en valeur des méthodologies pour mieux utiliser les outils de simulation comme support à une meilleure collaboration et coopération entre les acteurs-métiers, mais moins à des fins d'études du facteur humain (Mahdjoub et al., 2010 ; Mahdjoub et al., 2013; Vinck, 2009). Ainsi la plupart des méthodes développées pour favoriser la prise en compte du facteur humain en conception se concentre soit sur des outils adressés à des acteurs-métiers déjà sensibilisés à l'ergonomie (Plantard et al., 2017 ; Gallagher et al., 2017) soit sur des formations et des guides utilisateurs (David et al., 2008). Egalement, nous trouvons un certain nombre d'études proposant des démarches permettant de réaliser des analyses ergonomiques dont les outils d'évaluation sont les outils de simulation eux-mêmes. Par exemple, l'étude Geng et al., 2013, propose une démarche pour utiliser le mannequin numérique à des fins d'analyses ergonomiques. Cette démarche suppose que le concepteur a déjà acquis des connaissances significatives pour, d'une part utiliser les bonnes options ergonomiques proposées dans le logiciel et, d'autre part utiliser les connaissances en facteur humain pour bien interpréter les résultats obtenus. Nous pouvons aussi citer l'étude de De Sa & Zachmann, 1999, qui met en évidence le potentiel de la réalité virtuelle pour réaliser des analyses ergonomiques en conception mais à condition que les acteurs-métiers soient formés aussi bien au facteur humain qu'aux technologies de réalité virtuelle. Nous pouvons dès lors émettre une limite sur le déploiement de la nouvelle démarche PEAM dans le département de maintenabilité. Nous l'avons diffusée après une courte formation auprès des acteurs-métiers en maintenabilité, également, à la fin de chaque session de formation où nous avons distribué un guide synthétique détaillant chaque étape de la démarche. Or, il semble que le déploiement de PEAM n'a été principalement déployée que sur des phases spécifiques et non sur l'ensemble des phases composant le processus de conception en maintenabilité. Nous pouvons, dès lors, faire raisonnablement l'hypothèse qu'une formation plus longue et plus approfondie autour des outils de simulation à des fins d'analyses du facteur humain aurait pu les aider à mieux comprendre l'intérêt d'une telle analyse sur l'ensemble des étapes du processus de conception.

Ainsi, notre expérimentation comparant des analyses de maintenabilité, intégrant une approche du facteur humain, menées sans et avec la démarche PEAM nous permet de mettre en évidence que :

- Un support méthodologique permet de mieux choisir les outils de simulation dans chacune des phases du processus de conception, de plus, chaque approche du facteur humain reste associée à un seul outil de simulation ;

- Les indicateurs ergonomiques utilisés sont plus nombreux à chacune des phases où PEAM est déployée ;
- Le pourcentage d'utilisation de chacun des indicateurs ergonomiques est plus élevé lorsque PEAM est déployée ;
- La répartition des analyses de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain met en avant deux phases du processus de conception : les phases 2 et 5, respectivement de pré-développement et de validation, qui sont reconnues comme des étapes clés de validation.

Ainsi, ces différentes analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse H4 : « La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité par des non experts en ergonomie ».

3.2. Questionnaire sur le retour d'expériences de la démarche PEAM

Nous avons diffusé un questionnaire auprès de chaque utilisateur de PEAM. Ce questionnaire a été rempli par chacun à la fin de chaque utilisation de la démarche PEAM, soit un total de 44 fois. Il permet de noter sur une échelle de 1 à 5 (1 étant en désaccord total et 5 en accord total) trois affirmations : PEAM est efficace ; PEAM est claire ; PEAM est pertinente. Egalement, le temps mis pour utiliser l'outil PEAM a dû être noté après chaque usage. Enfin, un suivi de chaque projet et de chaque acteur-métier de la part du spécialiste en facteur humain a permis de recueillir le retour d'expériences, les limites et les points forts de la démarche PEAM.

L'analyse de chacune des affirmations montre d'abord que la notation de l'efficacité n'entraîne pas d'effet phase avec un score moyen de 3,9 ($\pm 0,2$) sur 5 précisant ainsi que, pour chaque phase d'étude, les acteurs-métiers ont eu le sentiment de s'approprier la démarche en exploitant mieux les outils de simulation et en notant de manière juste les indicateurs ergonomiques. En revanche, nous avons observé un effet phase pour la notation de la clarté et de la pertinence. Pour ces deux affirmations, seule la phase 1 est significativement différente des phases 2, 4 et 5 qui elles, ne présentent pas de différences significatives. Pour la phase 1, nous observons un score faible respectivement de 2 ($\pm 0,1$) et de 3 ($\pm 0,2$) pour la clarté et la pertinence. Nous rappelons que dans cette phase, le mannequin numérique a été l'outil de simulation support à l'ensemble des analyses de maintenabilité en intégrant une approche du facteur humain.

Tout d'abord, le faible score de la pertinence relevé en phase 1 est à mettre en lien avec le constat fait en chapitre 2 sur la dimension collaborative dans les étapes de conception où la définition de la situation de travail n'est pas optimale. Dans cette première phase les informations techniques transmises à l'acteur-métier en maintenabilité sont parfois incomplètes ou non définies (Pistikopoulos et al., 2000). Ce manque d'informations techniques entraîne une mauvaise

interprétation de l'activité future de l'opérateur de la part de l'acteur-métier en maintenabilité. L'ingénieur ou le technicien en maintenabilité ne sait pas placer parfaitement le mannequin numérique dans son environnement, induisant donc une posture parfois peu réaliste mais également une mauvaise interprétation des risques encourus dans la zone de travail. Ce constat entraîne aussi un manque de confiance dans les résultats émanant des études du facteur humain réalisées au travers du mannequin numérique de la part des acteurs-métiers des autres départements du bureau d'études. D'une part, l'approche facteur humain n'est pas réalisée par un ergonome et d'autre part la connaissance technique des outils de simulation pour réaliser ces études du facteur humain n'est pas totalement connue, maîtrisée et donc acquise (Regazzoni & Rizzi, 2014; De Sa & Zachmann, 1999). Broberg, 2007, dans son étude comparative entre des bureaux d'études de différentes entreprises, met en évidence le manque de connaissances en ergonomie des acteurs-métiers spécialisés en conception justifiant, entre autre, la faible optimisation du compromis entre critères techniques et exigences ergonomiques. A l'inverse, Belleghem, 2018, décrit l'activité de simulation en conception comme bénéfique et efficace parce qu'elle place l'ergonome au même niveau que les autres acteurs-métiers du bureau d'études dans le processus de conception itératif. Or, dans notre cas, l'objectif n'est pas de viabiliser l'ergonome au sein du bureau d'études mais de rendre autonome l'acteur-métier en maintenabilité pour réaliser des approches du facteur humain basiques afin qu'il puisse, par la suite, échanger avec l'expert en ergonomie. Nous pouvons donc supposer que l'approche PEAM, pour convaincre les autres départements en interaction avec la maintenabilité, doit faire l'objet d'une double formation : 1) formation sur le potentiel des outils de simulation et plus particulièrement le mannequin numérique, 2) formation sur l'efficacité de la nouvelle approche, lorsqu'elle est utilisée par des non experts en ergonomie. Ainsi, les acteurs-métiers des autres départements gagneront en confiance vis-à-vis des données techniques et ergonomiques provenant de la maintenabilité.

Au-delà de la pertinence, dans la phase 1, la démarche PEAM s'est révélée peu claire devant certaines situations de travail : l'identification de certains risques semble difficile de la part de l'acteur-métier en maintenabilité (collisions, pincements, brûlures ou encore le risque de chute). Le manque d'identification de risques peut ainsi être directement corrélé avec le manque de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers du département de maintenabilité, comme nous l'avons observé en chapitre 1. De plus, la phase 1 correspond aux phases préliminaires de conception, où la définition de l'environnement de travail reste faible en accord avec les travaux de Pistikopoulos et al. (2000). Ainsi, en plus du manque de connaissances en facteur humain, l'acteur-métier en maintenabilité n'a pas toutes les données techniques pour bien comprendre la situation de travail qu'il doit étudier dans cette phase. Ce constat assoie donc un peu plus notre proposition de changement de paradigme évoquée en chapitre 2. Nous avons en effet expliqué que les tâches de maintenance sont aujourd'hui analysées une par une dans chaque zone de travail, alors qu'en pratique, dans une même zone de travail, plusieurs tâches de maintenance sont effectuées (De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014; Bernard et al., 2018). Le changement de paradigme que nous avons alors proposé au chapitre 2 se confirme pour l'utilisation du mannequin numérique et donc dans les premières phases de conception. Nous proposons d'effectuer l'analyse de maintenabilité avec une approche du facteur humain permettant d'étudier **plusieurs tâches de maintenance pour une même zone de travail**. Cette approche pourrait permettre d'avoir une

meilleure vue d'ensemble des principales problématiques liées à l'interaction entre l'opérateur et son environnement de travail. Ce changement de paradigme proposé pour le mannequin numérique en phase 1 pourrait d'ailleurs être généralisé aux autres outils de simulation (réalité virtuelle et maquette physique) et aux autres phases d'étude du processus (2, 3, 4 et 5) pour renforcer les analyses de maintenabilité.

Plus globalement, au travers de l'ensemble des échanges verbaux avec les utilisateurs, toutes phases d'étude confondues, la clarté de la démarche PEAM a pu être remise en question notamment à cause de l'outil EMMA développé au sein d'Airbus et intégré dans PEAM (cf chapitre 3). L'utilisation de l'outil EMMA (Ergonomie Merkmal Methode Airbus) (Klussmann et al., 2010) au travers de la démarche PEAM oblige en effet l'acteur-métier en maintenabilité à se connecter à une application internet dédiée, ce qui d'une part l'oblige à utiliser un autre outil et d'autre part constitue une augmentation importante du temps dans l'analyse menée. Cela engendre ainsi au fur et à mesure des utilisations de la démarche PEAM une lassitude, voire, un agacement de l'utilisateur pouvant l'amener à abandonner cette sous-analyse. De plus, les acteurs-métiers en bureau d'études maintenabilité n'ont pas su faire le lien entre certains critères de l'outil EMMA et les caractéristiques de la situation de travail de maintenance analysée. Nous pouvons l'expliquer par l'origine même du développement d'EMMA dédié pour les chaînes d'assemblage. Cet outil est donc consacré à des situations de travail souvent différentes de celles rencontrées par les opérateurs de maintenance. Ainsi, EMMA, pourtant jugé par les ergonomes comme intuitif et facile dans son usage n'a pas su convaincre les non experts.

Ainsi, notre expérimentation évaluant l'efficacité, la clarté et la pertinence de la démarche PEAM nous permet de mettre en évidence que :

- La démarche PEAM est efficace, permettant d'exploiter et de quantifier plusieurs indicateurs ergonomiques dans l'ensemble des phases du processus de conception ;
- La démarche PEAM est claire dans son usage, excepté à travers le mannequin numérique où des difficultés ont été ressenties pour bien comprendre l'environnement de travail. En particulier, le lien entre les critères de l'outil EMMA et les caractéristiques de la situation de travail analysée qui ont entraîné quelques erreurs d'interprétation ;
- La démarche PEAM s'est globalement révélée pertinente sur l'ensemble des étapes du processus de conception ainsi qu'à travers l'exploitation des outils de simulation. En d'autres termes, une fois l'approche facteur humain terminée, la présentation des résultats a été bien interprétée par l'ensemble des acteurs métiers des départements composant le bureau d'études de notre entreprise, notamment en session collaborative. Même si la réticence de certains acteurs-métiers est exprimée, d'une part pour utiliser des outils de simulation et d'autre part pour réaliser les analyses ergonomiques souhaitées.

Il y a donc également un travail de pédagogie et d'accompagnement à conduire pour convaincre de l'utilité de l'approche du facteur humain au sein des bureaux d'études. D'ailleurs, des recherches ont estimé que l'analyse ergonomique était en soi un acte pédagogique (Dugué et al., 2010). En effet, elle favorise la réflexion de chaque acteur-métier du bureau d'études, aussi bien dans l'analyse que dans les échanges collaboratifs, à des fins d'optimisation des solutions, notamment pour trouver les compromis entre les critères techniques et les exigences ergonomiques sur la base de règles métiers communes, en accord avec les travaux de Martin & Badarat (2003).

Ainsi, ces différents résultats et analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse H5 : « *la nouvelle démarche PEAM se révèle efficace tant dans son exploitation que dans la pertinence des résultats obtenus* ».

4. Synthèse de la discussion

Tableau 35: Synthèse de la discussion.

Hypothèses	
<p>H4 : La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité par des non experts en ergonomie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ PEAM permet de mieux choisir les outils de simulation dans le processus de conception, en outre, pour chaque analyse du facteur humain, un seul outil de simulation est déployé ; ➤ Les indicateurs ergonomiques utilisés sont plus nombreux à chacune des étapes du processus où des études du facteur humain ont été réalisées mais également, le pourcentage d'usage de chacun d'eux demeure plus élevé ; ➤ Globalement, la répartition des études du facteur humain met en avant deux phases du processus de conception : la phase 2 et la phase 5, respectivement de pré-développement et de validation, qui sont des phases de validation majeures dans le processus ; ➤ Une meilleure formation des acteurs-métiers sur l'intérêt et le fonctionnement de PEAM aurait pu les aider à mieux répartir leurs analyses sur l'ensemble des étapes du processus.
<p>H5 : la nouvelle démarche PEAM se révèle efficace tant dans son exploitation que dans la pertinence des résultats obtenus.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ PEAM reste, en s'appuyant sur les outils de simulation actuellement utilisés par les acteurs-métiers dans leurs pratiques de tous les jours, efficace sur l'ensemble des phases d'étude du processus ;

	<ul style="list-style-type: none">➤ PEAM, reste cependant complexe pour réaliser des analyses du facteur humain au travers du mannequin numérique intégré au modèle 3D dans les premières phases de conception. En effet, les caractéristiques de la tâche étudiée ne sont pas toujours connues par l'acteur-métier en maintenabilité (Cf chapitre 2) ;➤ Un travail pédagogique est à conduire avec les autres départements du bureau d'études pour les convaincre de l'utilité des analyses de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain à travers les outils de simulation et la démarche PEAM proposée.
--	---

5. Conclusion et synthèse du chapitre

Le chapitre 4 a permis de valider la démarche PEAM. Afin que nous soyons complets, nous l'avons évaluée sous deux points. Le premier point a permis de comparer des analyses de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain, menées avant puis après l'intégration de PEAM dans le département de maintenabilité. Le deuxième point a permis de récolter le retour d'expériences des utilisateurs de PEAM, sous forme d'affirmations autour de l'efficacité, de la clarté et de la pertinence de la démarche. Ces trois dimensions peuvent servir à valider une approche en accord avec les travaux de Gilbert (1980). Plusieurs résultats sont à retenir sur la base de nos analyses et expérimentations:

- Les outils de simulation sont utilisés de manière cohérente et pertinente dans chacune des phases du processus conception par rapport aux indications et recommandations de la démarche PEAM. Nous observons notamment que l'acteur-métier utilise bien un outil de simulation par approche du facteur humain et non plusieurs, comme nous l'avons également constaté sans le déploiement de PEAM. Ceci a pour avantage de gagner en efficacité et pertinence dans la réalisation des analyses de maintenabilité en exploitant au mieux chaque outil de simulation ;
- Les indicateurs ergonomiques sont davantage exploités, tant par leur nombre (gestes, postures, efforts,...) que par leur pourcentage d'utilisation sur l'ensemble du processus, permettant dès lors de mieux intégrer les caractéristiques, les attentes et les besoins des opérateurs de maintenance dans le processus de maintenabilité ;
- Les phases 2 et 5, respectivement de pré-développement et de validation, sont reconnues comme étant des phases critiques dans le processus de conception. Elles semblent être mieux gérées puisque nous observons un nombre d'approches du facteur humain plus important, associant les bons outils de simulation et les indicateurs ergonomiques adéquats, en accord avec la démarche PEAM proposée ;

- L'utilisation du logiciel EMMA, un outil Airbus Group dédié aux analyses ergonomiques en chaîne d'assemblage et aux non experts en ergonomie (chapitre 3) s'est finalement révélé complexe dans son utilisation. Les acteurs-métiers avaient parfois du mal à voir le lien entre les critères ergonomiques d'EMMA et les caractéristiques de la situation de travail à analyser rendant la démarche PEAM parfois peu claire et longue à déployer ;
- PEAM semble s'être révélée plus difficile à exploiter devant quelques situations de travail. Les acteurs-métiers en maintenabilité ont pu ressentir des difficultés pour percevoir le lien entre les indicateurs ergonomiques proposés et la tâche de maintenance à étudier. Cette difficulté semble liée d'une part aux manques de connaissances en ergonomie des acteurs-métiers, de savoir-et de savoir-faire des outils de simulation et d'autre part au manque de données techniques transmises par les autres départements du bureau d'études ;
- Un travail de pédagogie est à conduire auprès des acteurs-métiers des autres départements pour d'une part, les convaincre de l'utilité des approches du facteur humain sur la base des outils de simulation actuellement en place, et d'autre part, pour améliorer encore l'efficacité de la démarche PEAM afin de favoriser l'articulation entre critères techniques et exigences ergonomiques.

CHAPITRE V. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Chapitre 5 : Discussion générale et perspectives

1. Discussion générale	220
1.1. <i>Comprendre l'approche facteur humain en maintenabilité</i>	221
1.2. <i>Les outils de simulation supports de l'approche facteur humain en maintenabilité</i>	223
1.3. <i>Développement d'une démarche d'aide à l'analyse ergonomique pour non spécialiste en ergonomie</i> 227	
1.4. <i>Validation de la démarche PEAM</i>	231
1.5. <i>Synthèse et limites</i>	234
2. Perspectives de recherche	237
2.1. <i>Etendre notre démarche à tous les départements du bureau d'études</i>	237
2.2. <i>Etendre l'analyse à d'autres outils de simulation</i>	239
2.3. <i>Etendre notre démarche aux erreurs humaines</i>	242

1. Discussion générale

Dans un contexte de concurrence internationale accrue où la complexité croissante des aéronefs ne cesse d'augmenter, associée à une généralisation de la tolérance aux conditions sévères d'usage, la maîtrise de la qualité reste indispensable tout comme la rentabilité en termes de production ou d'exploitation. Ces exigences, aussi indispensables que vitales, ne peuvent être conduites sans l'Homme qui est au cœur du processus de maintenance, tant en termes de prises de décisions que d'actions. Cependant, en accord avec les travaux de James Reason en 1993, « l'Homme est un agent de fiabilité faillible », c'est-à-dire que malgré son savoir et son savoir-faire au travail, l'Homme peut s'écarter des tâches prescrites, prendre des initiatives qui peuvent le conduire à mal exécuter une tâche et à prendre des risques pour sa santé et sa sécurité, et celles des autres. Ainsi, la prise en compte du facteur humain en maintenabilité pourrait permettre de mieux anticiper les futures tâches de maintenance et donc l'activité des opérateurs qui en découle. Dans les bureaux d'études dédiés, composés principalement d'ingénieurs et de techniciens spécialisés en conception et en maintenance, l'usage d'outils de simulation numériques et physiques permet d'anticiper et d'évaluer, au regard d'aspects très normatifs, l'activité possible des opérateurs de maintenance. En effet, la maintenabilité prend de plus en plus en compte le facteur humain, notamment à travers la composante physique de l'ergonomie, dans l'industrie aéronautique, pour anticiper la conception des aéronefs (Misra et al., 2008). Conformément à la réglementation CPA FAR / CS-25.1309, pour la catégorie des avions (EASA, 2011; FAA, 2012), la seule recommandation obligatoire est d'assurer la fiabilité de l'avion pendant l'activité de maintenance. Pour le secteur des hélicoptères, il n'existe aucune recommandation officielle, mais cette industrie anticipe un potentiel futur changement et considère l'intégration du facteur humain comme une priorité absolue pour accroître la sécurité des opérations de maintenance et des vols. Or, sans cadre de travail spécifique et défini, chaque industrie (avions et hélicoptères) développe ses propres méthodes de travail et ses exigences pour prendre en compte le facteur humain dans ses études de maintenabilité comme elle l'entend et surtout, comme elle peut en fonction de ses moyens et de ses compétences.

La problématique étudiée dans cette thèse, au sein d'un constructeur d'hélicoptères, s'est intéressée justement à :

« Comment mieux prendre en compte le facteur humain dans les phases de développement et de conception en maintenabilité, là où les acteurs-métiers ne sont ni formés, ni initiés au facteur humain, et en particulier à l'ergonomie. »

Pour répondre à cette problématique, notre démarche et nos objectifs de travail se sont articulés autour de quatre grands axes de recherche, à savoir :

- Comprendre l'approche existante concernant la prise en compte du facteur humain en maintenabilité ;

- Les outils de simulation comme support à l'approche du facteur humain en maintenabilité ;
- Développement d'une démarche d'aide (PEAM) à l'analyse et à l'intégration du facteur humain en maintenabilité, pour des non spécialistes en ergonomie ;
- Validation de la démarche PEAM proposée.

1.1. Comprendre l'approche facteur humain en maintenabilité

Nous avons, dans un premier temps, cherché à comprendre le fonctionnement et le rôle de la maintenabilité chez notre industriel aéronautique pilote, fabricant d'hélicoptères, en particulier dans sa façon d'intégrer ou non le facteur humain. Ainsi, nous avons établi une première contribution à laquelle le premier chapitre a permis de répondre :

Contribution n°1 : Comprendre au sein d'une entreprise pilote relevant de l'aéronautique, les pratiques mises en place pour intégrer le facteur humain en maintenabilité.

Une observation des pratiques sur l'ensemble du département de la maintenabilité a donc été réalisée. Les résultats obtenus à l'aide d'un questionnaire semi-directif auprès de 15 acteurs-métiers du même département ont été appuyés par l'analyse de documents techniques décrivant les analyses de maintenabilité intégrant le facteur humain. Ces résultats ont permis dans un premier temps de comprendre comment le facteur humain est intégré aux analyses de maintenabilité. D'abord, nous avons remarqué qu'aucun ergonome n'est présent ou sollicité par ce département. En d'autres termes, en maintenabilité, la prise en compte du facteur humain se fait uniquement par des non spécialistes dans le domaine travaillant par intuition, par expérience de l'activité de maintenance. Ils se basent sur la lecture de normes et de standards en ergonomie, en particulier, la norme MIL STD 1472 intitulée « Design criteria human engineering ». Cette norme relève du composant humain, tel que défini par l'ergonomie, touchant ainsi l'anthropométrie, les efforts ou encore les gestes et les postures. Nos travaux ont néanmoins montré qu'il y a bien une volonté d'intégrer le facteur humain au processus de conception en maintenabilité mais qu'elle se limite bien souvent à l'ergonomie physique et donc, comme évoqué, aux aspects très normatifs associés. Dès lors, les acteurs-métiers n'intègrent pas l'ensemble des composantes que l'Association Internationale d'Ergonomie (IEA, 2000) incite à explorer dans toutes études où il existe des interactions Homme-machine, à savoir l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle. Cette observation est en accord avec les travaux de Broberg (2007) qui font en effet un constat similaire dans diverses industries telles que l'électronique, la chimie et la construction. L'auteur précise ainsi que les acteurs-métiers des bureaux d'études essaient d'intégrer le facteur humain sans avoir de connaissances, d'expériences dans ce domaine ni même la connaissance de l'environnement réel de travail des opérateurs. Nous avons pu également observer que l'analyse de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain est souvent réduite à une faible quantité d'indicateurs relevant

justement du facteur humain, et donc de l'ergonomie. En effet, nos résultats montrent seulement l'utilisation de quatre indicateurs autour de la composante physique de l'ergonomie, à savoir : l'accessibilité, le désassemblage, l'interchangeabilité et la tribologie (frottement/contact entre les pièces et outils). On ne trouve aucun indicateur relevant des composantes cognitives et organisationnelles de l'ergonomie, alors que notre état de l'art sur le sujet, montre qu'une trentaine d'indicateurs devraient pouvoir être pris pour les trois composantes citées de l'ergonomie. Les travaux de Moreu De Leon et al. (2012), montrent d'ailleurs la nécessité d'apporter aux acteurs-métiers des bureaux d'études en maintenabilité, des outils d'analyses pour les aider à mieux prendre en compte divers paramètres et indicateurs afin de mieux qualifier et quantifier l'activité de travail des opérateurs de maintenance dans les phases de conception.

Egalement, pour supporter les analyses de maintenabilité et intégrer à minima le facteur humain, les ingénieurs et les techniciens utilisent et s'appuient sur des outils de simulation numériques (modeleur 3D sans mannequin numérique, mannequin numérique et réalité virtuelle) ou physiques (maquette physique) confirmant les travaux de Regazzoni & Rizzi, 2014 ; Seth et al., 2011. En effet, ces derniers précisent que ces outils numériques peuvent se révéler efficaces pour évaluer des tâches de maintenance et mieux intégrer le facteur humain en phase de conception. Cette approche, chez notre industriel aéronautique pilote, reste néanmoins très ponctuelle, sans méthodologie réellement définie et surtout sans l'implication d'opérateurs réels, comme nous avons pu le montrer. Ce résultat se rapproche de celui de nombreux auteurs, qui évoquent le déploiement d'outils de simulation en maintenabilité sans évoquer le niveau de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers des bureaux d'études. Par exemple, Geng et al., 2013 évoquent la pertinence des options analysant le champ de vision, les postures ou encore les efforts sans jamais évoquer le savoir et le savoir-faire nécessaires pour bien interpréter les résultats. Nous remarquons aussi de manière générale que l'approche du facteur humain conduite reste très subjective et ne touche que la composante physique de l'ergonomie, omettant, comme déjà évoqué, les deux autres composantes de l'ergonomie (cognitives et organisationnelles). En effet, nos résultats montrent que quel que soit l'outil de simulation utilisé, ce sont principalement des indicateurs proches de ceux de l'ergonomie physique qui ressortent, notamment l'accessibilité ou encore certains risques comme les collisions avec l'environnement. La littérature scientifique sur le sujet présente de la même façon beaucoup de travaux d'auteurs très orientés aussi sur la composante physique de l'ergonomie, et donc sur le composant humain, ses caractéristiques, l'environnement et beaucoup moins, voire pas du tout sur le contenu de l'activité des opérateurs et leur organisation. Les travaux de Regazzoni & Rizzi, 2014 ; Seth et al., 2011 s'orientent tous vers une analyse de la composante physique de l'ergonomie à partir d'outils de simulation sans se préoccuper des autres composantes pourtant indispensables pour bien intégrer le facteur humain dans le processus de conception. Ainsi, nous avons pu répondre à notre première hypothèse de travail associée à la contribution n°1, à savoir : **H1 « l'absence de connaissances en facteur humain ne permet pas aux acteurs-métiers en maintenabilité d'intégrer efficacement le facteur humain dans les projets qu'ils conduisent. »**

Egalement, nous avons pu exploiter les résultats de notre deuxième partie du questionnaire semi-directif afin d'observer le degré d'intégration du facteur humain dans le temps, sur l'ensemble du processus de conception en maintenabilité. Les résultats ont montré que sur l'ensemble des étapes qui composent le processus, la prise en compte du facteur humain se faisait dans un certain

désordre, voire une certaine confusion, traduisant peu de rigueur, aucune méthode et/ou méthodologie définies. Les travaux de Garrigou et al., 2001, confirment également ce manque de prise en compte de l'ergonomie dans les processus de conception, expliquant même que cela constitue selon ses propos une « remorque » de la technique. Ce constat est finalement assez classique, poussant de nombreux auteurs traitant de l'ergonomie à développer des méthodologies d'intervention dans le processus de conception depuis les années 1990 pour tenter d'équilibrer les composantes techniques et ergonomiques (Daniellou, 1987 ; Bellemare et coll., 1995 ; Daniellou et Naël, 1995). Nos observations mettent également en avant que le pourcentage d'acteurs-métiers n'intégrant pas le facteur humain atteint 60% sur l'ensemble du département. Cela veut dire également que 40% des acteurs-métiers du département maintenabilité essaient de prendre en compte le facteur humain mais comme, expliqué précédemment, sans connaissances spécifiques en ergonomie. Or, la littérature propose pourtant des études de maintenabilité intégrant une approche facteur humain à travers des outils de simulation qui sont déjà bien connus par les acteurs-métiers en maintenabilité, mais sans réellement faire le lien, voire l'articulation, entre le technique et le facteur humain dans le processus de conception (Regazzoni & Rizzi, 2014 ; Seth et al., 2011). Or, selon Mahdjoub et al.(2013) et Vinck (2009), les outils de simulation sont également connus pour être utilisés dans les différentes phases d'étude du processus, pour permettre aux acteurs-métiers de mieux collaborer. Dans ce cadre, ces outils de simulation permettent de générer des représentations intermédiaires, voire des objets intermédiaires de conception (OIC) : croquis, maquettes, prototypes,... permettant à chaque acteur-métier du bureau d'études de mieux se comprendre et se coordonner, de mieux collaborer (Vinck, 2009). Nous supposons dès lors, que si les outils de simulation sont plus répandus, mieux connus et mieux maîtrisés, les OIC qui en découlent seront mieux interprétés par les acteurs-métiers en bureau d'études. Ils pourront désormais les aider en maintenabilité à mieux prendre en compte le facteur humain, de manière plus structurée, plus organisée, sur l'ensemble du processus de conception. Ainsi, nous avons pu répondre à notre deuxième hypothèse de travail associée à la contribution n°1, à savoir : **H2 : « l'absence de méthodes prédéfinies et formalisées pour intégrer le facteur humain en maintenabilité explique une approche surtout techno-centrée en maintenabilité. »**

À travers les résultats obtenus, nous avons pu aboutir à notre première contribution. Celle-ci nous amène ainsi à nous intéresser aux outils de simulation, déjà connus et maîtrisés par les acteurs-métiers en maintenabilité à des fins de conception, mais qui semblent pouvoir être un support précieux dans la prise en compte du facteur humain, justement en conception .

1.2. Les outils de simulation supports de l'approche facteur humain en maintenabilité

Sur la base de notre premier chapitre et de notre première contribution, nous avons décidé de focaliser la suite de notre étude, d'un commun accord avec le groupe projet, sur les outils de simulation en bureau d'études. Ces outils sont déjà connus et maîtrisés par les acteurs-métiers en maintenabilité à des fins d'analyses techniques. Or, ces mêmes outils de simulation, qu'ils soient

digitaux (mannequin numérique, réalité virtuelle) ou physiques (maquette physique), sont aussi des outils qui peuvent être le support d'approches du facteur humain dans la conception. Ainsi, il a été décidé d'étudier l'apport de chacun de ses outils de simulation, déjà en place, pour réaliser des analyses de maintenabilité incluant une meilleure approche du facteur humain, devenue indispensable.

Par conséquent, pour bien comprendre l'apport de chacun de ces outils de simulation à des fins d'analyses ergonomiques, nous avons étudié dans ce deuxième chapitre la contribution suivante :

Contribution n°2 : Observer, analyser, évaluer, dans l'état actuel des pratiques des acteurs-métiers en maintenabilité en bureau d'études d'un constructeur d'hélicoptères, les limites et les avantages des outils de simulation mis à leur disposition, à des fins d'approche du facteur humain.

Grâce aux résultats obtenus dans le cadre de notre expérimentation visant à étudier chacun des outils de simulation disponibles chez notre industriel, nous avons pu mettre en évidence le potentiel de chacun d'eux en termes d'approches ergonomiques pendant les analyses de maintenabilité. Dans ce cadre, et afin de rester complet sur le sujet, nous avons évalué, pour chacun des outils de simulation (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique), les mêmes 11 tâches de maintenance avec les mêmes opérateurs au sein même de notre entreprise pilote. Ainsi, les opérateurs réels ont participé aux expérimentations sur la plateforme de réalité virtuelle et sur la maquette physique. Nous avons reproduit leurs caractéristiques anthropométriques sur les mannequins numériques. Egalement, pour réduire l'écart entre le monde virtuel et réel, il a été ajouté sur la plateforme de réalité virtuelle des éléments physiques, synchronisés avec le monde réel. La figure 66 présente un exemple de simulation d'une tâche de maintenance avec chacun des trois outils de simulation étudiés.

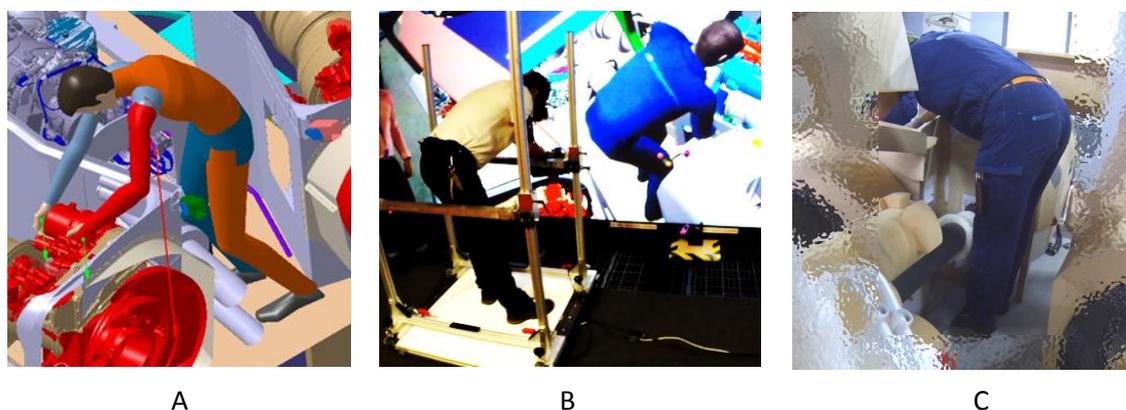


Figure 66 : Opérateur effectuant la même tâche de maintenance entre le mannequin numérique (A), la plateforme de réalité virtuelle (B) et la maquette physique (C). La même posture est observée dans ce cas.

Tout d'abord, nous avons pu montrer, qu'au travers de la réalité virtuelle et de la maquette physique, la différence dans la prise en compte des indicateurs physiques (efforts, postures...) et cognitifs (charge mentale) de l'ergonomie n'est pas significative. En d'autres termes, que l'opérateur réel effectue la tâche sur la plateforme de réalité virtuelle ou sur la maquette physique, les résultats concernant les indicateurs physiques et cognitifs amèneront aux mêmes constats. Dans cette expérimentation, la maquette physique nous a servi de référence puisqu'elle permet de réaliser une

analyse ergonomique avec autant de précision que dans une situation réelle comme le précisent Das & Sengupta, 1996 ; Theureau, 1997 ; Bellies & François, 2016. Ainsi, nous pouvons expliquer le faible écart entre la maquette physique et la plateforme de réalité virtuelle par le dispositif mis en place au travers de notre plateforme de réalité virtuelle. En accord avec les travaux Menezes et al., 2018, qui insistent sur l'efficacité de l'intégration d'éléments physiques sur une plateforme de réalité virtuelle, nous avons souhaité insérer dans notre plateforme de réalité virtuelle des pièces physiques comme le montre la photo B de la figure 66. Ces éléments physiques représentent les contacts primaires (parois, trappes etc) et des pièces mobiles avec un système de « tracking » (clé dynamométrique réelle et alternateur) afin de mieux reproduire les conditions dans lesquelles les efforts sont réellement exécutés , à l'image également de la maquette physique, ceci expliquant les résultats précédemment traduits.

Cependant, même si l'écart entre réel et virtuel pour l'étude des indicateurs physiques n'est pas significatif, nous avons observé, pour certaines périodes sur certaines tâches, de petites variabilités en termes de gestes et de postures. Certains éléments physiques (tuyauteries hydrauliques, cloison pare-feu...) sur la plateforme de réalité virtuelle ont pu soit ne pas être pertinents soit ne pas être présents. Cela ayant pour conséquence, des postures voire des comportements de la part de l'opérateur, différents de ceux observés sur la maquette physique. Ces éléments physiques sont régulièrement en contact avec l'opérateur et peuvent donc impacter son comportement, sa posture, sa gestuelle et sa perception. Par exemple, dans notre approche, nous avons omis de mettre certains tuyaux hydrauliques ce qui a eu pour effet des postures peu pénalisantes pour l'opérateur sur la plateforme de réalité virtuelle alors qu'elles étaient pénalisantes sur la maquette physique. L'étude de Seth et al., 2011, précise ainsi que pour la simulation d'une séquence d'assemblage, l'ajout d'éléments physiques pertinents sur une plateforme de réalité virtuelle contribue à réduire l'écart avec le réel. Il est donc nécessaire de mieux anticiper la préparation de la simulation sur la plateforme de réalité virtuelle afin de sélectionner, en amont, les éléments physiques qui seront potentiellement les plus en contact avec l'opérateur. Par cette amélioration, la différence entre le virtuel et le réel sera encore plus faible et l'analyse des indicateurs encore plus fiable.

La durée d'exécution des tâches de maintenance des opérateurs réels présente cependant des différences significatives entre l'exécution des tâches réalisées sur la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. Plus précisément, sur la plateforme de réalité virtuelle, les durées sont souvent plus courtes ou plus longues que la situation de référence à travers la maquette physique. Cet écart à plusieurs causes possibles en accord avec la littérature. Les travaux de Loomis & Philbeck, 2008, expliquent qu'un des enjeux majeurs dans la simulation de l'activité de travail en réalité virtuelle est l'amélioration de la perception spatiale. L'amélioration du graphisme, de la profondeur de champ et de l'échelle des objets virtuels visualisés contribue à réduire l'écart de la durée d'exécution entre le réel et le virtuel. Cette amélioration est potentiellement une solution pour réduire l'effet de cinétose, comme le précise Chen et al., 2017. Nous avons aussi observé cet effet durant nos expérimentations. Ainsi, ces améliorations pourraient permettre de fiabiliser l'évaluation du temps d'exécution des tâches sur la plateforme de réalité virtuelle et donc de réduire davantage l'écart entre virtuel et réel.

Concernant le mannequin numérique, ne faisant pas intervenir d'opérateur réel, cela permet uniquement d'évaluer la composante physique de l'ergonomie, en l'occurrence ici, les postures et la sécurité au travail. Nous avons pu observer des différences significatives, concernant les indicateurs de posture et de sécurité sur l'aire de travail, évalués entre le mannequin numérique et les deux autres outils de simulation. Le mannequin numérique semble poser quelques difficultés en termes de simulation et d'interprétation d'une situation de travail en maintenance pour l'acteur-métier en maintenabilité. En effet, le mannequin numérique est très souvent utilisé dans les premières phases du processus de conception où, selon Pistikopoulos et al., 2000, la définition de la situation de travail n'est pas encore optimale dans cette phase et les informations transmises à l'acteur-métier en maintenabilité changent souvent, chaque jour, en raison d'un processus itératif très court. Ce constat nous montre que les informations techniques provenant des différents départements du bureau d'études vers la maintenabilité ne sont pas toujours transmises clairement. Cela laissant ainsi une plus grande liberté à l'interprétation de la situation de travail de la part de l'acteur-métier en maintenabilité. Nous supposons également, que dans les premières phases de conception, les informations techniques ne sont pas toutes entièrement définies ni figées. Ainsi, le paradigme existant pour la réalisation d'analyses de maintenabilité, incluant une approche facteur humain, est de réaliser une étude complète pour chaque tâche de maintenance. La majorité des travaux de la littérature à ce sujet propose d'étudier les tâches de maintenance indépendamment les unes des autres (De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014) ce qui ne semble pas forcément pertinent pour les analyses avec le mannequin numérique. En effet, si l'ingénieur ou le technicien en maintenabilité n'a pas toutes les données techniques de l'environnement, la tâche étudiée ne sera pas ou peu représentative de l'activité future de l'opérateur de maintenance. **Nous proposons alors un nouveau paradigme pour les études du facteur humain à partir du mannequin numérique, qui consisterait à étudier plusieurs tâches de maintenance dans une même zone de travail et non une seule tâche avec le paradigme actuel.** Les indicateurs ergonomiques, du moins ceux relevant de la composante physique, pourraient ainsi être évalués avec le mannequin numérique en sélectionnant et en simulant diverses tâches de maintenance pour une même zone. Par exemple, à travers une trappe, plusieurs tâches peuvent être effectuées imposant d'utiliser des outillages différents sur plusieurs pièces différentes. Au lieu d'étudier la maintenance sur une seule pièce avec un outillage dédié selon le paradigme actuel, l'acteur-métier étudiera l'activité de maintenance sur plusieurs pièces avec plusieurs outillages selon le nouveau paradigme proposé. Son rapport d'études critiquera ainsi l'ensemble de la zone en évaluant toutes les contraintes physiques potentielles pour l'opérateur. Cette nouvelle approche pourrait permettre d'avoir une meilleure vue d'ensemble des principales problématiques liées à l'interaction entre le mannequin numérique et l'environnement dès les premières phases de conception.

Egalement, comme le précisent Rabardel et al., 2014, un grand nombre d'indicateurs étudiés, à l'image des nôtres, dans notre expérimentation, peuvent être évalués simplement, avec l'appui d'outils de simulation, puisque de nombreux outils simples existent et peuvent être utilisés par des non experts en facteur humain grâce à une formation spécifique adaptée. Nous pensons entre autre, à la grille APACK (Chitescu et al., 2003) ou encore à l'outil RULA (McAtamney, 1993) qui se composent d'un algorithme à suivre étape par étape pour obtenir, in fine, un score vis-à-vis des

recommandations, des normes et des standards ergonomiques. Ainsi, ces différentes observations et analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse **H3** :

« Dans un contexte de maintenabilité (bureau d'études), les outils de simulation numériques et physiques peuvent se révéler pertinents, voire efficaces pour mieux intégrer le facteur humain dans les activités conduites, par des non experts en ergonomie ».

À travers les résultats obtenus, nous avons ainsi pu aboutir à notre deuxième contribution. Celle-ci nous amène donc à nous focaliser sur les outils de simulation qui peuvent aider les non spécialistes en facteur humain à réaliser des analyses de maintenabilité avec une approche facteur humain.

1.3. Développement d'une démarche d'aide à l'analyse ergonomique pour non spécialiste en ergonomie

Sur la base des deux premiers chapitres et des conclusions qui en ont découlé, nous avons pu montrer que les acteur-métiers en maintenabilité n'ont pas de formation en ergonomie mais essaient de prendre en compte l'approche du facteur humain autour de la composante physique de l'ergonomie plus facile à comprendre et à appliquer car s'appuyant sur des normes et des standards ergonomiques. L'approche reste avant tout intuitive, ne demandant pas de démonstration, et donc très subjective, peu, voire non structurée, basée en effet sur le ressenti propre et l'expérience de l'acteur-métier en maintenabilité. Egalement, selon nos observations, confirmant les travaux de la littérature (De Sa et Zachmann, 1999 ; Gironimo et al., 2004 ; Broberg 2007 ; Regazzoni et Rizzi, 2014 ; Krüger et Nguyen, 2015), il ressort que les outils de simulation (mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique) restent sous-exploités, voire mal exploités, pour réellement prendre en compte le facteur humain dans toutes ses dimensions au sein du processus de conception en maintenabilité. Pourtant, ces outils de simulation, bien connus et maîtrisés par les ingénieurs et techniciens pour des études de conception, permettent, en accord avec les travaux de nombreux auteurs (Lorisson, 2010; Seth et al, 2011 ; Hashim et al., 2014 ; Nishanth et al., 2015), de conduire de vraies approches ergonomiques. Nous avons observé que les outils de simulation habituellement utilisés à des fins d'analyses techniques peuvent être de réels supports efficaces pour une meilleure intégration du facteur humain. En accord avec les travaux de Pontonnier et al (2014) et Aromaa et al (2016), il est mis en évidence que chacun de ces outils, de par leurs caractéristiques et spécificités, peut permettre de supporter les analyses ergonomiques dans les phases de conception. De ce fait, en accord avec le groupe projet, nous avons décidé de développer une démarche adressée aux non experts en facteur humain du département maintenabilité leur permettant, en toute autonomie, de mieux intégrer le facteur humain au cours de leurs analyses de maintenabilité. Ainsi, notre troisième contribution est :

Contribution n°3 : Sur la base des outils et moyens existants, développer une démarche favorisant l'intégration du facteur humain en maintenabilité pour des non experts en ergonomie.

L'objectif est donc de proposer une démarche pour mieux intégrer le facteur humain lors des analyses de maintenabilité avec le support des outils de simulation déjà connus et maîtrisés par les acteurs-métiers du département maintenabilité. Cette démarche, appelée PEAM pour « Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability », en français « Analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité », est dédiée à tous les acteurs-métiers travaillant dans le département de la maintenabilité, sans expérience et compétence en facteur humain. Nous rappelons que la maintenabilité doit trouver la meilleure solution technique et / ou organisation du travail en anticipant les activités de maintenance. Cette démarche, pour être efficace, doit être utilisée par tous les acteurs-métiers. Ainsi, en accord avec les travaux de Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009, pour accroître l'acceptabilité de la méthode, et en ne changeant pas radicalement les habitudes actuelles, il a été nécessaire que cette démarche s'appuie sur le processus de maintenabilité déjà connu et pratiqué par les acteurs-métiers en maintenabilité. Cette démarche s'inscrit dans le processus actuel, c'est-à-dire qu'elle ne vient pas changer les habitudes mais agit comme un complément pour aider l'acteur-métier à mieux quantifier et prendre en compte le facteur humain dans ses activités de tous les jours. La figure 67 présente le modèle conceptuel retenu et validé par le groupe de travail, groupe qui a étudié le sujet durant 6 semaines. La démarche tient ainsi compte du processus actuel en adressant des recommandations en fonction du score d'analyse connu : A (la tâche de maintenance est réalisable sans contrainte pour l'opérateur), B (la tâche de maintenance est réalisable sous contraintes pouvant impacter l'opérateur), C et D (la tâche de maintenance est réalisable sous très fortes contraintes / voire une impossibilité de faire la tâche). L'acteur-métier en maintenabilité peut choisir de déployer la suite de la démarche PEAM s'il sélectionne le score C ou D.

Ensuite, une fois que la décision de déployer entièrement PEAM est prise, une originalité apparaît pour le choix des outils de simulation. Il est proposé à l'acteur-métier de sélectionner l'outil de simulation le plus adapté à chaque phase du processus de conception de la maintenabilité. Les outils de simulation, en accord avec nos résultats du chapitre 2 et les travaux de Chitescu et al., (2003), peuvent s'avérer plus ou moins performants en fonction de la phase d'étude du processus de conception dans laquelle ils sont déployés à des fins d'analyses ergonomiques. Or, en maintenabilité, la littérature dans son ensemble ne fait pas de distinction entre les phases du processus pour le déploiement de ces outils de simulation, que ce soit le mannequin numérique (Di Gironimo et al, 2004 ; Regazzoni et al., 2013) ou encore la réalité virtuelle (Garza et al, 2013 ; Seth et al, 2011). Ainsi, en accord avec notre groupe projet, au vu des résultats issus de notre chapitre 2 montrant l'efficacité des outils de simulation en fonction des phases du processus de conception, nous avons décidé d'associer ces outils en fonction des phases du processus dans lesquelles ils seraient les plus pertinents et efficaces.

L'autre originalité de notre démarche PEAM est le déploiement de protocole dédié pour chaque outil de simulation afin d'évaluer au mieux les indicateurs ergonomiques lors de la simulation d'une tâche de maintenance. En accord avec le groupe projet, nos protocoles respectent les préconisations et recommandations de Béguin et Weill-Fassina, 1997 ; Rabardel et al., 2014 qui détaillent la mise en place de protocoles structurés et homogènes pour assurer des simulations efficaces en vue de réaliser une analyse ergonomique pertinente. Toutefois, ces protocoles, parfois complexes et dédiés surtout aux spécialistes en facteur humain, ont été allégés, toujours d'un commun accord, pour

qu'ils puissent être déployés par des non spécialistes en facteur humain. Ainsi, notre démarche PEAM se veut complète et adaptative à chaque outil de simulation afin d'étudier, si possible, l'ensemble des composantes de l'ergonomie (physiques, cognitives et organisationnelles) tout en s'adressant à des non experts en facteur humain. L'analyse et la quantification des indicateurs ergonomiques retenues, sur la base des protocoles déployés pour chaque outil de simulation, se basent sur la logique d'algorithmes existants tels que les outils d'évaluation RULA (McAtamney & Corlett, 1993 ; pour l'évaluation de la charge de travail des membres supérieurs), REBA (Hignett & McAtamney, 2000 ; pour l'évaluation de la charge de travail des membres supérieurs et inférieurs), OCRA (Occhipinti, 1998 ; pour l'évaluation de la charge de travail des membres supérieurs), NIOSH (Waters et al., 1993 ; pour l'évaluation du port de charges), NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988 ; pour l'évaluation de charge mentale). Ces algorithmes permettent de donner un score aux indicateurs ergonomiques retenus. La notation de la situation de travail permet à l'acteur-métier en maintenabilité d'autoévaluer la situation qu'il a lui-même conçue et de percevoir aussi les conséquences de ses choix de conception en termes de sécurité, de bien-être, de santé et d'efficacité. Les itérations étant assez courtes entre les différents bureaux d'études, l'acteur-métier peut lui-même argumenter sur d'éventuelles problématiques soulevées par l'intégration du facteur humain dans son analyse de maintenabilité. Un spécialiste en ergonomie pourra alors, en tant qu'expert, si besoin, reprendre l'analyse réalisée par l'acteur-métier en maintenabilité et investiguer davantage la tâche de maintenance simulée initialement.

La figure 67, représentant le modèle conceptuel de la démarche PEAM, traduit l'ensemble des étapes et des originalités qui la composent.

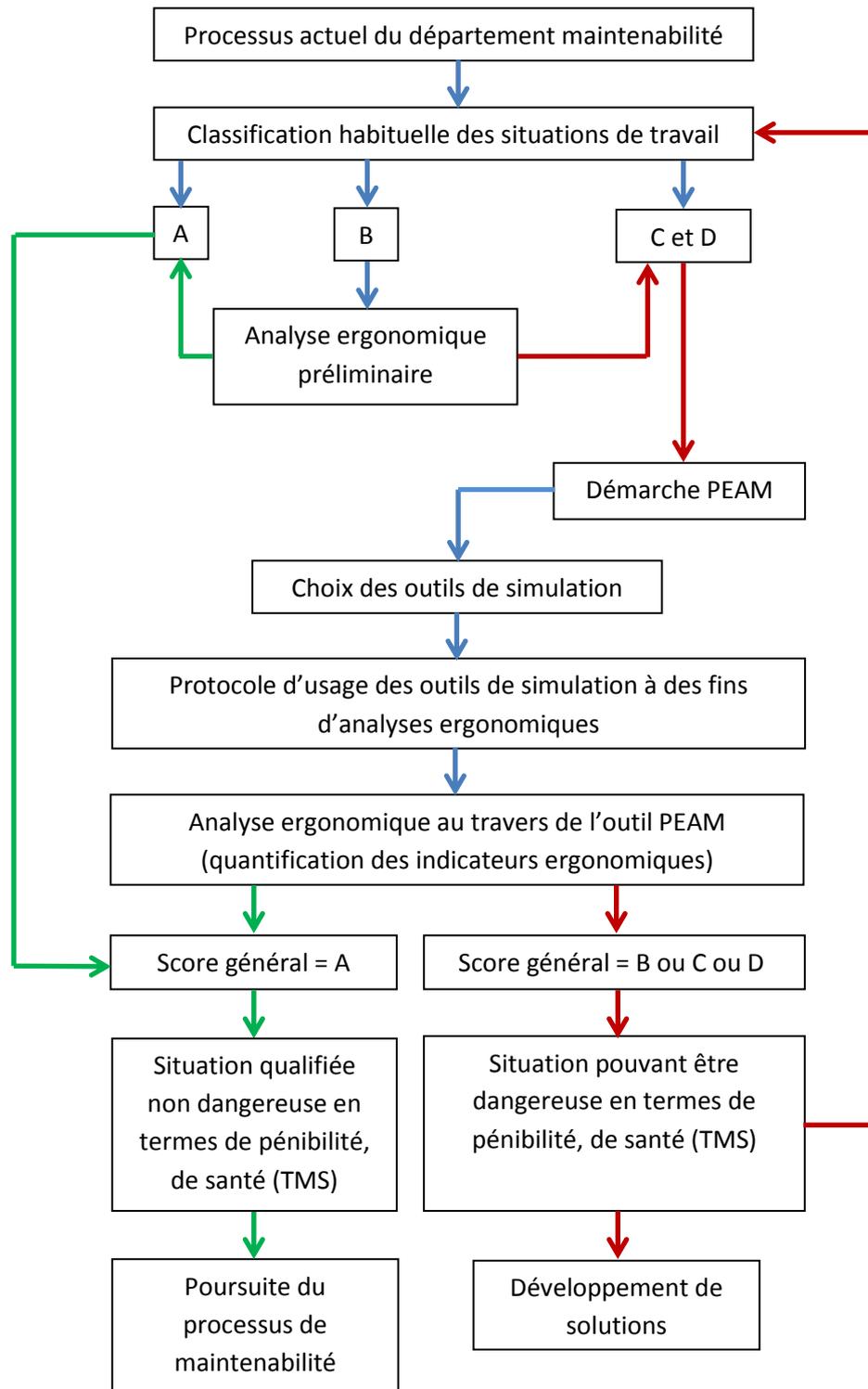


Figure 67 : Modèle conceptuel de la démarche d'analyses ergonomiques PEAM.

Pour résumer, PEAM vise à :

- Faciliter le déploiement d'une approche permettant de mieux intégrer le facteur humain dans un processus de maintenabilité existant ;
- Permettre le choix des outils de simulation les plus appropriés aux étapes du processus de conception de maintenabilité actuellement en place ;
- Déployer un protocole d'études rigoureux permettant de préparer l'observation des situations de travail présentes et à venir, avec une approche du facteur humain ;
- Choisir et évaluer les indicateurs ergonomiques les plus appropriés en fonction de la situation de travail étudiée.

À travers les résultats obtenus, nous avons ainsi pu aboutir à notre troisième contribution à savoir « Sur la base des outils et moyens existants, développer une démarche favorisant l'intégration du facteur humain en maintenabilité pour des non experts en ergonomie ». Afin d'observer si cette démarche est acceptée et apporte un impact positif au département de la maintenabilité, nous nous sommes proposés de la valider sur des situations industrielles réelles.

1.4. Validation de la démarche PEAM

Le chapitre 3 a donc permis de développer une nouvelle démarche appelée PEAM permettant de mieux intégrer le facteur humain dans les analyses de maintenabilité et ceci tout au long de ce processus de maintenabilité déjà défini et opérationnel. Afin de valider notre démarche PEAM, nous l'avons déployée auprès des ingénieurs et techniciens du département maintenabilité. Ainsi, notre quatrième et dernière contribution s'intéresse à :

C4 : Valider la démarche PEAM proposée au sein du département de maintenabilité de notre industriel aéronautique pilote.

Nous avons ainsi comparé les analyses de maintenabilité incluant une approche du facteur humain avant et après le déploiement de PEAM dans le département concerné. Nous avons également diffusé un questionnaire auprès des utilisateurs de PEAM pour recueillir leur retour d'expériences. Cette expérimentation permet de faire ressortir les points importants suivant :

Tout d'abord, sur l'ensemble des phases du processus, la phase 2 intitulée « revue de pré-développement » se distingue des autres puisqu'elle est la phase où la majorité des analyses ergonomiques est réalisée (50%). Nous pouvons expliquer cette observation par l'importance de cette phase qui est considérée comme clé sur l'ensemble du processus de conception. En effet, cette phase est cruciale dans le processus de conception (Blanchard, 2014) car les spécifications techniques d'un hélicoptère sont déterminées et validées en fonction des besoins initiaux du cycle de vie du produit.

Egalement, avec le déploiement de PEAM, les outils de simulation sont utilisés de manière cohérente dans chacune des phases du processus de conception par rapport aux indications de la nouvelle démarche. Sur l'ensemble des phases, nous observons que l'acteur-métier utilise bien un seul outil de simulation pour la prise en compte du facteur humain en accord avec nos recommandations, et non plusieurs, comme nous l'avions constaté sans le déploiement de PEAM. Ceci a pour avantage de gagner en efficacité, en évaluant une situation de travail au mieux avec un seul outil faisant gagner du temps dans les boucles itératives qui jalonnent le processus de conception. Nous remarquons aussi qu'un plus grand nombre d'indicateurs ergonomiques est exploité, en moyenne cinq indicateurs contre trois sans PEAM, pour chaque analyse de maintenabilité. Nous observons aussi que leur pourcentage d'utilisation dans l'ensemble des analyses conduites est plus élevé. Plus particulièrement, avec la réalité virtuelle et la maquette physique, l'acteur-métier, sans connaissance en facteur humain, analyse bien l'ensemble des composantes de l'ergonomie, à savoir les composantes physiques à travers une approche portant sur l'anthropométrie, les postures, les efforts..., et cognitives sur la base de l'étude de la charge mentale et organisationnelle en tenant compte de la durée d'exécution des tâches et de la sécurité au travail.

Ainsi, sans le déploiement de PEAM, le manque de connaissances en facteur humain et le manque de savoir et savoir-faire sur les outils de simulation peuvent expliquer le faible déploiement des outils de simulation et des indicateurs ergonomiques. L'acteur-métier en maintenabilité ne sachant pas comment un outil de simulation numérique ou physique pourrait l'aider dans son approche du facteur humain, peut parfois prendre la décision ne pas l'utiliser (Bernard et al., 2017). Par ailleurs, la littérature met en valeur des méthodologies pour mieux utiliser ces outils de simulation comme support à une meilleure collaboration et coopération entre les acteurs-métiers, mais moins à des fins d'études du facteur humain (Mahdjoub et al., 2010 ; Mahdjoub et al., 2013; Vinck, 2009). De ce fait, la plupart des méthodes développées pour favoriser la prise en compte du facteur humain en conception se concentre soit sur des outils adressés à des acteurs-métiers déjà sensibilisés à l'ergonomie (Plantard et al., 2017 ; Gallagher et al., 2017) ou soit sur des formations et des guides utilisateurs (David et al., 2008). Nous trouvons aussi un certain nombre d'études proposant des démarches permettant de réaliser des analyses ergonomiques et dont les outils d'évaluation sont les outils de simulation eux-mêmes. Par exemple, l'étude Geng et al., 2013, propose une démarche pour utiliser le mannequin numérique à des fins d'analyses ergonomiques. Cette démarche suppose que le concepteur a déjà acquis des connaissances significatives pour, d'une part, utiliser les bonnes options ergonomiques proposées dans le logiciel mais, d'autre part, utiliser les connaissances en facteur humain pour bien interpréter les résultats obtenus. Or, notre démarche s'adresse à des non experts en facteur-humain et montre pourtant la capacité des acteurs-métiers en maintenabilité à bien choisir les outils de simulation au bon moment dans le processus de conception, les protocoles déployés, les bons indicateurs...

Ainsi, la démarche PEAM semble être efficace puisqu'elle permet à des non experts en ergonomie de mieux définir les espaces de travail, les efforts, les postures... Les différents constats de notre expérimentation permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse **H4** : « *La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer le facteur humain en maintenabilité par des non experts en ergonomie* ».

Le niveau de satisfaction de l'outil PEAM a également révélé des points forts mais aussi des points d'amélioration à conduire. Tout d'abord, PEAM est une démarche qui s'est révélée efficace à travers toutes les phases du processus de conception. En d'autres termes, PEAM a bien permis d'atteindre l'objectif fixé, de quantifier les bons indicateurs ergonomiques de la situation de travail étudiée et d'utiliser les bons outils de simulation au bon moment. L'acteur-métier a ainsi su exploiter la démarche pour mieux utiliser les outils de simulation qui sont à sa disposition en quantifiant en même temps les indicateurs ergonomiques pertinents et ceci tout au long du processus de maintenabilité.

Toutefois, la clarté de PEAM semble perfectible pour la phase 1 qui ressort de façon significative des autres phases : l'identification de certains risques semble difficile de la part de l'acteur-métier en maintenabilité (collisions, pincements, brûlures ou encore le risque de chute). Le manque d'identification de risques peut ainsi être directement corrélé avec le manque de connaissances en facteur humain des acteurs-métiers du département de maintenabilité, comme nous l'avons observé en chapitre 1. De plus, la phase 1 correspond aux phases préliminaires de conception, où la définition de l'environnement de travail reste faible en accord avec les travaux de Pistikopoulos et al. (2000). Ainsi, en plus du manque de connaissances en facteur humain, l'acteur-métier en maintenabilité n'a pas toutes les données techniques pour bien comprendre la situation de travail qu'il doit étudier dans cette phase. Ce constat assoie donc un peu plus notre proposition de changement de paradigme évoqué en chapitre 2. Nous y avons expliqué que les tâches de maintenance sont aujourd'hui analysées une par une dans chaque zone de travail, alors qu'en pratique, dans une même zone de travail, plusieurs tâches de maintenance sont effectuées (De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014; Bernard et al., 2018). Le changement de paradigme que nous avons alors proposé au chapitre 2 se confirme donc dans les premières phases de conception. Nous proposons d'effectuer l'analyse de maintenabilité avec une approche du facteur humain permettant d'étudier **plusieurs tâches de maintenance pour une même zone de travail**. Cette approche pourrait permettre d'avoir une meilleure vue d'ensemble des principales problématiques liées à l'interaction entre l'opérateur et son environnement de travail. Ce changement de paradigme proposé pour le mannequin numérique en phase 1 pourrait d'ailleurs être généralisé aux autres outils de simulation (réalité virtuelle et maquette physique) et aux autres phases d'étude du processus (2, 3, 4 et 5) pour renforcer les analyses de maintenabilité.

Egalement, la pertinence de PEAM dans cette même phase 1 est faible, c'est-à-dire que les résultats des analyses du facteur humain ne convainquent par les autres départements du bureau d'études. Nous pouvons l'expliquer par l'usage du mannequin numérique dans cette phase 1 pour réaliser les simulations. Or, l'ingénieur ou le technicien en maintenabilité ne sait pas toujours placer parfaitement le mannequin numérique dans son environnement, induisant donc une posture parfois peu réaliste mais également une mauvaise interprétation des risques encourus dans la zone de travail. En effet, les acteurs-métiers en bureau d'études connaissent mal cet outil de simulation à des fins d'analyses ergonomiques et ont du mal à être convaincus par les résultats des analyses associées (Duffy, 2016). Ainsi, l'approche facteur humain n'est pas réalisée par un ergonome pouvant faire douter les acteurs-métiers en bureau d'études. Broberg, 2007, dans son étude comparative entre des bureaux d'études de différentes entreprises, met en évidence le manque de

connaissances en ergonomie des acteurs-métiers spécialisés en conception justifiant, entre autre, la faible optimisation du compromis entre critères techniques et exigences ergonomiques. A l'inverse, Belleghem, 2018, décrit l'activité de simulation en conception comme bénéfique et efficace parce qu'elle place l'ergonome au même niveau que les autres acteurs-métiers du bureau d'études dans le processus de conception itératif. Or, dans notre cas, l'objectif n'est pas d'intégrer, voire de viabiliser, l'ergonome au sein du bureau d'études mais de rendre autonome l'acteur-métier en maintenabilité pour réaliser des approches basiques du facteur humain afin qu'il puisse, par la suite, échanger avec l'expert en ergonomie. Nous pouvons donc supposer que l'approche PEAM, pour convaincre les autres départements en interaction avec la maintenabilité, doit faire l'objet d'une double formation : 1) formation sur le potentiel des outils de simulation et plus particulièrement le mannequin numérique, 2) formation sur l'efficacité de la nouvelle approche, lorsqu'elle est utilisée par des non experts en ergonomie. Ainsi, les acteurs-métiers des autres départements gagneront en confiance vis-à-vis des données techniques et ergonomiques provenant de la maintenabilité.

Nous pouvons alors résumer le niveau de satisfaction de la démarche PEAM :

- PEAM est efficace, permettant d'exploiter et de quantifier plusieurs indicateurs ergonomiques dans l'ensemble des phases du processus de conception ;
- PEAM est claire dans son usage, excepté dans la phase 1 avec le mannequin numérique où des difficultés ont été ressenties pour bien comprendre l'environnement de travail ;
- PEAM s'est globalement révélée pertinente sur l'ensemble des étapes du processus de conception ainsi qu'à travers l'exploitation des outils de simulation associés. En d'autres termes, une fois l'approche du facteur humain terminée, la présentation des résultats a été bien interprétée par l'ensemble des acteurs métiers des départements composant le bureau d'études de notre entreprise, notamment en session collaborative.

Ainsi, ces différentes analyses permettent de confirmer et de généraliser notre hypothèse **H5** : **« la nouvelle démarche PEAM se révèle efficace tant dans son exploitation que dans la pertinence des résultats obtenus ».**

1.5. Synthèse et limites

Sur la base de nos résultats issus de nos travaux de recherche, nous avons étudié quatre contributions majeures qui ont permis de répondre à notre problématique générale de recherche. Nous avons ainsi développé une démarche soutenant les acteurs-métiers en maintenabilité pour mieux prendre en compte le facteur humain dans les analyses de maintenabilité. Cette approche, dans sa philosophie ne se substitue pas à l'expertise d'un ergonome mais se propose de bien soutenir, accompagner, l'acteur-métier dans sa réflexion pour mieux concevoir autour de l'activité de maintenance des hélicoptères. Plus précisément, cette proposition de démarche a pour but de mieux exploiter les outils de simulation numériques et physiques actuellement en place et utilisés

sur l'ensemble des étapes du processus de conception. Egalement, des indicateurs ergonomiques relevant des différentes composantes de l'ergonomie peuvent être évalués, par des non experts en ergonomie, grâce à la démarche proposée et exploitée.

Nos travaux mettent ainsi en évidence qu'une démarche supportant les analyses de maintenabilité permet de prendre en compte le facteur humain par des non spécialistes en maintenabilité. Les approches du facteur humain étant réalisées de manière plus rigoureuse au travers d'outils de simulation mieux exploités, donc davantage d'indicateurs ergonomiques sont observés et évalués.

Nos travaux de thèse ont permis d'obtenir de nombreux résultats, mais il convient d'en traduire certaines limites.

Tout d'abord, le nombre de participants a parfois été faible, notamment dans l'évaluation des outils de simulation à des fins d'analyses de maintenabilité intégrant une approche facteur humain. Nous avons eu la participation de six opérateurs pour chaque tâche de maintenance étudiée. Ce faible nombre de participants est dû aux contraintes des plannings de maintenance de notre industrie. En effet, l'expérimentation conduite a nécessité d'avoir les mêmes opérateurs pour chacune des tâches et chacun des outils de simulation (réalité virtuelle et maquette physique) et dans ce cadre, il a été impossible d'avoir un plus grand nombre d'opérateurs disponibles.

Concernant la validation de la démarche PEAM, nous avons mené une étude comparative avant et après le déploiement de la nouvelle démarche dans le département de la maintenabilité. La période de l'expérimentation s'est étalée sur 16 mois. Nous avons observé une disparité des phases du processus de conception dans le déploiement de PEAM. Par exemple, les analyses du facteur humain en phase 3 intitulée « analyse de maintenabilité » ont été absentes, car aucun projet ne s'est présenté dans cette phase au cours des 16 mois d'observation. De plus, entre les deux périodes, les situations de travail n'étaient pas toutes similaires, pouvant constituer un biais pour certains résultats. Nous pouvons alors supposer que cette même étude sur une période plus longue aurait permis d'obtenir une meilleure visibilité du déploiement de PEAM sur toutes les phases d'étude du processus de maintenabilité tout en observant les mêmes situations de travail.

Egalement, notre recherche ne s'est focalisée que sur le département de la maintenabilité, puisque de par sa définition, la maintenabilité conçoit la future activité de maintenance. Or, le chapitre 1 a montré que certains départements du bureau d'études prenaient l'initiative de faire des études pour anticiper l'activité de maintenance sur les produits ou parties de l'hélicoptère qu'ils développent. Nous pouvons alors nous questionner sur le déploiement de notre approche PEAM sur l'ensemble des départements composant le bureau d'études. Nous aurions ainsi pu, avec une vue macroscopique sur l'ensemble du bureau d'études, développer une démarche encore plus large, touchant tous les départements, ce qui aurait été un réel plus concernant la collaboration multi-métiers.

Nous avons focalisé notre étude sur quatre outils de simulation : le modéleur, le mannequin numérique, la réalité virtuelle et la maquette physique. Or, il existe aujourd'hui de nouveaux outils en développement, parfois même déjà utilisés en entreprise comme la réalité augmentée qui sera

très prochainement implémentée dans les processus de conception du bureau d'études. Notre analyse ne l'a pas évoquée puisqu'elle s'est focalisée sur des outils uniquement déployés aujourd'hui en maintenabilité. L'ère du tout numérique évoluant très vite, nous pouvons nous poser la question de l'exploitation de PEAM à travers une telle technologie, voire d'autres.

Nos travaux se sont concentrés essentiellement sur des aspects de sécurité et de santé des opérateurs au travers de l'activité de maintenance. Or, d'autres études ont montré que cette activité est aussi la source d'erreurs entraînant des incidents voire des accidents aériens. Nous pourrions alors, dans ce cadre, imaginer des études ergonomiques plus larges pouvant permettre d'analyser aussi bien la sécurité que la santé des opérateurs, mais aussi les erreurs humaines. On peut les définir, selon Reason, 1990 « comme un terme générique pour englober toutes ces occasions dans lesquelles une séquence planifiée des activités mentales ou physiques n'atteint pas le résultat escompté, et quand ces échecs ne peuvent pas être attribués à l'intervention d'un facteur de risque ».

Enfin, nos travaux n'ont été réalisés que dans une seule entreprise. Afin de valider notre démarche à plus grande échelle, il conviendrait de la déployer auprès d'autres entreprises dont les caractéristiques peuvent différer ou non de celles de notre entreprise aéronautique pilote. Cependant, pour des raisons de confidentialité, nos travaux n'ont pu porter que sur une seule entreprise mais de contexte international. Nous envisageons donc prochainement, de réaliser une analyse similaire impactant d'autres entités d'Airbus, ne travaillant pas uniquement sur les hélicoptères avec des méthodologies de travail souvent différentes.

Afin de répondre à ces limites, différentes actions de recherche peuvent être explorées dans la continuité de nos travaux. Nous les présentons dans la section qui suit.

2. Perspectives de recherche

Les résultats obtenus dans le cadre de notre travail de recherche semblent montrer d'une part, la nécessité de mieux prendre en compte le facteur humain dans les phases de conception en maintenabilité, d'autre part, ils semblent montrer l'intérêt de notre démarche PEAM pour palier à ce manque actuel d'intégration du facteur humain en maintenabilité pour des raisons de manque de compétences de la part des acteurs-métiers concernés. Toutefois, certaines limites ont pu être identifiées. Pour y répondre, plusieurs actions de recherche peuvent être explorées. Nous en avons retenu trois principales, plausibles et intéressantes, pour le groupe projet qui nous a accompagnés, et que nous présentons dans les paragraphes qui suivent.

2.1. Etendre notre démarche à tous les départements du bureau d'études

Notre approche et nos travaux de recherche se sont uniquement focalisés au département maintenabilité du bureau d'études, comme déjà évoqué. Or nous avons vu dans le chapitre 1 que les autres départements réalisaient des études du facteur humain ponctuellement. Nous pouvons alors supposer que ces départements pourraient avoir l'intérêt d'acquérir un outil leur permettant d'intégrer le facteur humain dédié à leurs activités. D'ailleurs, lors du déploiement de la démarche PEAM, lorsque les résultats ont été présentés aux autres départements, certains acteurs-métiers de ces derniers ont manifesté leurs réels intérêts pour l'utiliser à leur tour. Cependant, PEAM a été développée au regard d'une étude exclusivement menée en maintenabilité dépendant du processus et des caractéristiques spécifiques à ce département. Aussi, un déploiement dans d'autres départements doit se faire sous certaines conditions en réalisant notamment une étude exploratoire similaire à celle conduite en maintenabilité et en suivant un protocole rigoureux pour chaque département :

- Observer et analyser les approches du facteur humain actuellement mises en place par les acteurs-métiers dans les autres départements composant le bureau d'études ;
- Conceptualiser l'utilisation actuelle des outils de simulation qui pourraient être communs aux acteurs-métiers dans chacun des départements composant le bureau d'études et pouvant supporter une approche du facteur humain ;
- Définir les indicateurs ergonomiques les plus pertinents dans les études menées au sein de chaque département. Cette analyse induit une étude large et exhaustive des différentes situations de travail auxquelles est confronté chaque acteur métier. Nous pouvons supposer, par exemple, que pour une même zone de travail, les départements spécialisés dans l'intégration d'éléments hydrauliques et ceux spécialisés dans

l'intégration d'éléments électriques n'auront pas la même perception des risques et des actions à faire réaliser par un opérateur,

- Conceptualiser les processus de conception établis pour chaque département. Nous avons vu que le département maintenabilité avait un processus qui lui est propre (vue microscopique), celui-ci s'insère dans un processus général (vue macroscopique). Nous pouvons donc supposer que chaque département a son propre processus qu'il conviendra d'étudier et de mettre en relation avec les autres processus des autres départements. Un outil équivalent à PEAM devrait alors s'adapter à tous les processus afin d'homogénéiser son déploiement et sa philosophie ;
- Ces premières observations doivent pouvoir conduire à une identification des points communs entre chaque département : outils de simulation utilisés, niveau de connaissances en facteur humain et processus interne....

La construction d'une démarche, si elle doit être similaire à PEAM, doit garder des critères d'analyses immuables en facteur humain :

- La participation d'opérateurs réels doit être systématique et obligatoire tant pour la simulation que pour la consultation des résultats et des solutions d'amélioration ;
- La démarche permettant de mieux intégrer le facteur humain doit rester dans un cadre où l'acceptabilité doit rester forte.

Cependant, le déploiement d'un tel outil, en vue de mieux intégrer le facteur humain dans chaque département à des fins d'analyses liées à la future maintenance, doit se faire en étroite articulation avec le département maintenabilité qui garde l'expertise, le savoir et le savoir-faire en matière d'analyse et d'anticipation de la maintenance future. Ainsi, au regard de la figure 68 déjà détaillée dans le chapitre 1, il est nécessaire de créer un lien entre l'axe 2 et l'axe 3, à savoir entre le département maintenabilité et les autres départements du bureau d'études. Nos travaux de recherche tendent à systématiser l'analyse ergonomique dans l'axe 2, c'est-à-dire en maintenabilité. En revanche, dans l'axe 3, touchant les autres départements du bureau d'études, l'analyse ergonomique restera ponctuelle. Néanmoins, la future démarche devra garantir au moins deux points importants à nos yeux :

- Assurer des résultats qui puissent être garants des caractéristiques, des attentes et du besoin des personnes, tous métiers confondus (objectif de l'approche proposée au début de ce paragraphe) ;
- Assurer un transfert des résultats, issus des approches du facteur humain conduites, vers le département de maintenabilité. L'objectif sera alors d'assurer un haut niveau de compréhension de la situation de travail étudiée ainsi que des approches du facteur humain associées.

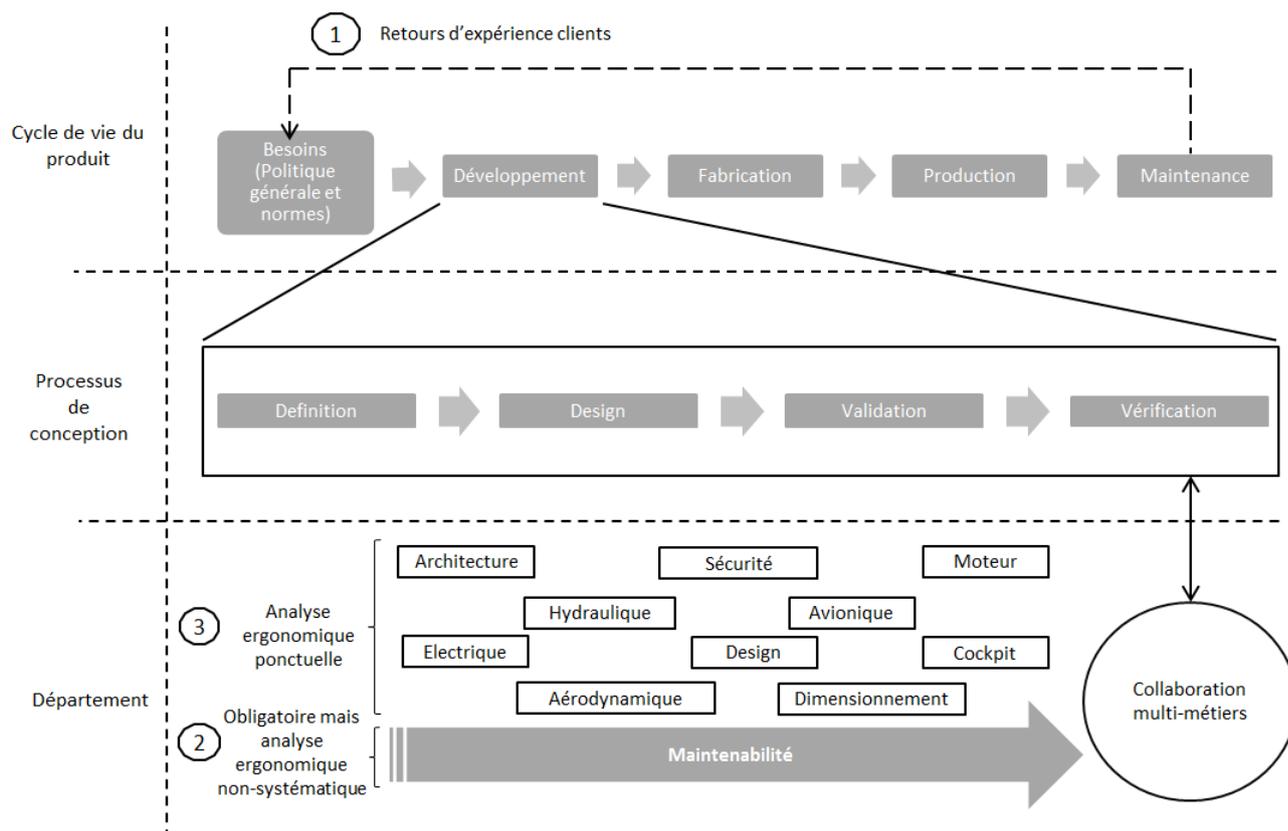


Figure 68 : Représentation des trois voies principales pour intégrer l’ergonomie dans le processus de conception en maintenabilité.

2.2. Etendre l’analyse à d’autres outils de simulation

Au travers de nos travaux de recherche menés chez un industriel aéronautique, nous avons focalisé notre approche autour de trois outils de simulation couramment utilisés en son sein : le mannequin numérique et la réalité virtuelle dans la catégorie des outils de simulation digitaux ; la maquette physique dans la catégorie des outils de simulation physiques. Ces trois outils sont utilisés aussi bien pour l’analyse de la conception que pour l’analyse ergonomique. Cependant, de nouvelles technologies émergent et concernent aussi bien le digital que le physique. En restant dans un cadre industriel avec des technologies qui commencent à être testées, voire à être déployées, nous pouvons citer la réalité augmentée. Nous proposons d’en dire un peu plus.

Tout d’abord, la réalité augmentée est de plus en plus étudiée et développée à des fins d’applications industrielles. Elle se définit comme une forme d’interaction entre l’utilisateur et le monde réel basée sur l’association/la superposition d’objets virtuels sur des objets réels, issue de l’environnement de l’utilisateur (Caudell & Mizell, 1992). Les technologies de réalité augmentée, à la différence de celles de réalité virtuelle, ne visent pas une substitution totale du monde réel par une analogie virtuelle. Azuma (1997) donne trois propriétés définissant la réalité augmentée :

- Intégration « transparente » d'entités virtuelles en trois dimensions dans un espace réel également en trois dimensions afin que l'utilisateur ne puisse pas distinguer les deux types d'environnement (Azuma et al., 2001) ;
- Interactivité en temps réel ;
- Disposition des objets virtuels et réels de façon cohérente les uns par rapport aux autres (notion de recalage).

Dans le monde industriel, cette technologie trouve sa place dans sa complémentarité avec les technologies de réalité virtuelle. Nous avons vu à travers nos travaux de recherches bibliographiques et nos usages au sein même de notre industriel aéronautique que la réalité virtuelle semble adaptée aux phases de conception pour anticiper l'activité future de maintenance (Chitescu et al., 2003, Bernard et al., 2018 ; Bernard et al, 2019). La réalité virtuelle est utilisée aussi pour former les opérateurs à certains gestes et postures à adopter pour réaliser des tâches précises, notamment en ajoutant des systèmes haptiques (Savall, J. et al 2002 ; Amundarain et al., 2003). L'immersion peut ainsi servir à familiariser les opérateurs à un futur environnement de travail afin qu'ils anticipent mieux l'organisation d'un atelier par exemple (Wu & Fei, 2011). En revanche, la réalité augmentée trouve davantage sa place sur le terrain, avec les opérateurs, pour les aider dans leurs tâches quotidiennes et les former à certaines séquences de travail.

En maintenance, les industriels commencent à l'exploiter pour aider les opérateurs à réaliser des tâches de maintenance non courantes, c'est-à-dire réalisées avec des intervalles importants (parfois plusieurs années entre ces tâches) laissant supposer une perte de connaissances par manque d'habitude, tant dans la séquence de travail que dans les outillages à utiliser. Nous observons quatre axes d'utilisation : la formation, la substitution à la documentation papier surtout pour les tâches de désassemblage/assemblage, la réparation et l'inspection (Palmarini et al., 2018). Le premier axe, la formation, est la raison même de la naissance de la notion de réalité augmentée au début des années 1990 mais ne représente que 15% des usages totaux de la réalité augmentée en maintenance (Palmarini et al., 2018). On parle aujourd'hui de la réalité augmentée comme d'une ressource pédagogique puisqu'elle permet de garder l'environnement physique réel facilitant l'apprentissage pour l'apprenant mais également l'interaction avec le formateur, contrairement à la réalité virtuelle où l'isolement inhibe partiellement voire totalement cette interaction (Burkhardt et al., 2003 ; Gavish, et al., 2015). Le deuxième axe est en plein développement par un grand nombre d'industriels qui voit en cette technologie un moyen de s'affranchir d'une documentation papier souvent peu accessible et peu claire pour l'opérateur, parfois-même source de non qualité ou d'erreurs. Cette catégorie représente 85% de tous les usages de la réalité augmentée en maintenance (Palmarini et al., 2018). Par exemple, en automobile, l'objectif est de réduire le texte, de digitaliser les images, d'améliorer la didactique des consignes, de préciser les outillages nécessaires à la réalisation de chacune des sous-tâches composant la tâche principale (Fiorentino et al., 2016). La figure 69 montre le contrôle qualité sur un moteur de voiture réalisé à l'aide d'un casque de réalité augmentée. On voit la superposition d'éléments virtuels sur le réel, indiquant les pièces à regarder en détail. Au-dessus du moteur s'ajoute des éléments virtuels sous forme d'écriture simple, indiquant les consignes à suivre pour mener à bien l'inspection.

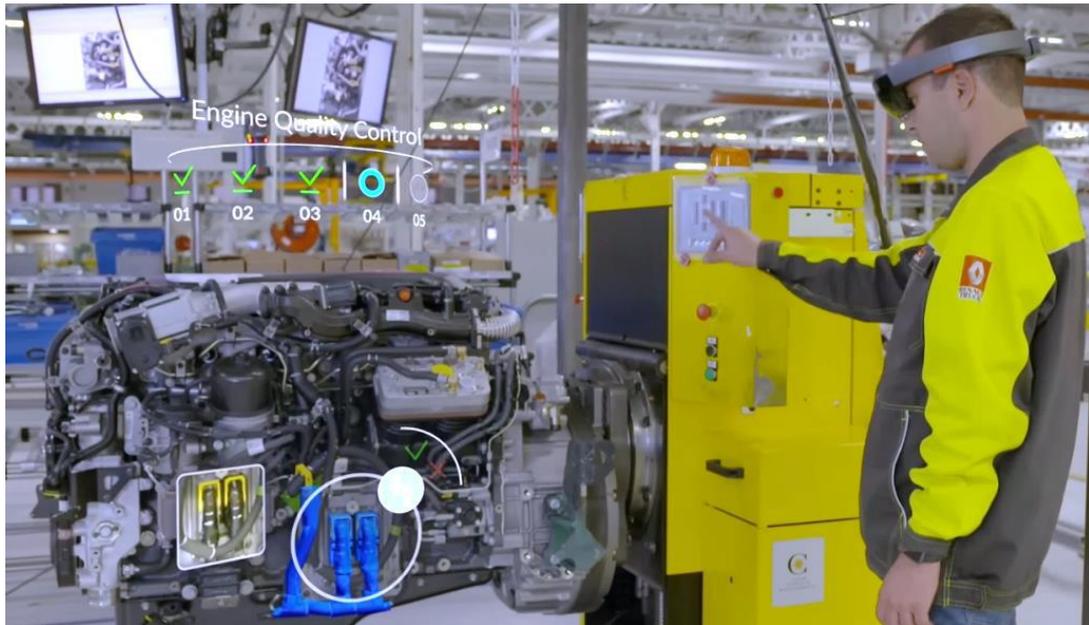


Figure 69: Exemple d'un contrôle qualité de moteur de voiture réalisé à l'aide d'un casque de réalité augmentée.

Ainsi, la réalité augmentée est un outil numérique de plus en plus utilisé en industrie. Nous pourrions alors nous poser la question de sa pertinence pour réaliser des analyses ergonomiques, au même titre que nous l'avons fait pour la réalité virtuelle. Plusieurs études se sont penchées sur la question. Prenons pour exemple celles de Aromaa & Väänänen, 2016, qui comparent réalité virtuelle et réalité augmentée avec des indicateurs semblables à ceux utilisés dans notre thèse : sécurité, effort, temps ou encore charge mentale. L'étude note le niveau de satisfaction de concepteurs pour l'analyse d'indicateurs ergonomiques pendant la conception. En utilisant une échelle de Likert (1 étant une très faible satisfaction et 5 une forte satisfaction), l'étude a montré que la plupart des indicateurs ergonomiques ont une meilleure appréciation à travers la réalité virtuelle qu'à travers la réalité augmentée. Seuls les effets de l'environnement sur l'activité et la charge mentale semblent mieux être appréciés dans l'évaluation. Cette approche est cohérente avec nos résultats puisque, rappelons-le, la charge mentale est bien plus élevée qu'à travers la maquette physique, soulevant des difficultés réelles pour l'opérateur pour appréhender souvent le monde virtuelle. La réalité augmentée laissant apparaître le monde réel, les repères spatiaux et la perception de l'environnement sont plus proches de la réalité.

Ce constat fait apparaître une complémentarité potentielle entre la réalité virtuelle et la réalité augmentée pour réaliser des analyses de maintenabilité avec une approche du facteur humain. Cependant, les études de Aromaa & Väänänen, 2016 mettent en doute la pertinence de l'usage de la réalité augmentée pour réaliser des analyses ergonomiques face à la réalité virtuelle.

La réalité mixte, qui a pour objectif de mélanger réalité virtuelle et réalité augmentée (figure 70) pourrait-elle coupler les avantages de ces deux outils à des fins d'analyses ergonomiques ?

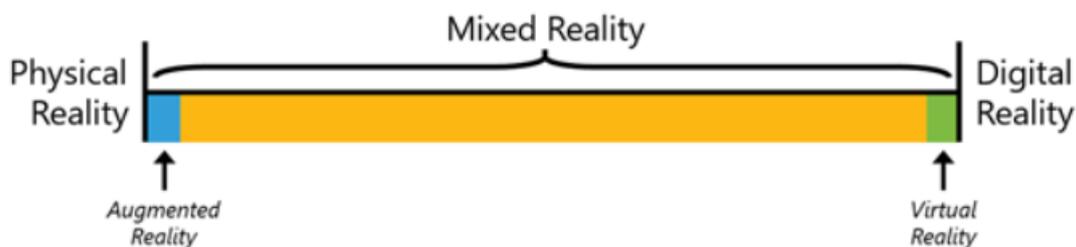


Figure 70 : “Spectre de la réalité mixte”, synergie entre réalité virtuelle et augmentée (trout et al., 2018).

Plusieurs études pourraient donc être menées, la première autour de l’efficacité de la réalité augmentée pour réaliser une analyse ergonomique. Dans ce cadre, nous pourrions nous questionner sur comment l’outil PEAM pourrait s’adapter à cette nouvelle technologique. Nous pourrions aussi nous poser ces mêmes questions autour de la technologie émergente que représente la réalité mixte.

2.3. Etendre notre démarche aux erreurs humaines

Nous avons vu dans le chapitre 1 que dans la communauté scientifique, deux courants principaux s’intéressent au facteur humain en maintenance. Ainsi certains auteurs se focalisent sur l’étude des erreurs humaines en maintenabilité (Shanmugam & Paul Robert, 2015), d’autres s’interrogent plus spécifiquement sur les conditions de travail des opérateurs de maintenance (Chang et al., 2010), et sur les enjeux en termes de santé des opérateurs. Notre étude s’est largement focalisée sur le deuxième axe. Or, la littérature et les constats industriels dans le secteur aéronautique ont montré que des problèmes lors des opérations de maintenance, comme des non-conformités, ont pu conduire à des incidents, voire des accidents. L’amélioration des techniques d’analyses après incident et leur suivi montrent, en effet, que presque 12% des accidents sont d’origine humaine lors de l’exécution de tâches de maintenance (Hobbs, 2000). La littérature et l’observation industrielle ont, en effet, identifié des erreurs humaines comme l’omission, les installations incorrectes ou encore les mauvaises pièces montées (Latorella, 2000). D’autres études ont précisé que 34% (McDonald et al., 2000) des tâches routinières sont réalisées sans conformités et 64% des opérateurs ne suivent pas les consignes, les normes et les recommandations mais travaillent surtout par expérience (Chaparro et al., 2004 ; Tricot, 2009). De plus, la maintenance est considérée comme une activité longue, complexe et physiquement exigeante (efforts, douleurs et postures associées, inconfort) ce qui génère des effets sur la santé (TMS, accidents du travail, charge cognitive élevée engendrant irritations, stress...) (Chang et al, 2010) et constitue un terrain favorable à la production d’erreurs.

Plusieurs études ont identifié les erreurs les plus communes avec effets immédiats de l’erreur humaine dans la maintenance aéronautique. Une étude a montré la distribution de 122 erreurs de maintenance sur une période de trois ans au sein d’une grande compagnie aérienne: omissions (56%), installations incorrectes (30%), mauvaises pièces (8%), autres (6%) (Graeber et Marx, 1993).

Une autre étude menée sur trois ans par l’Autorité de l’Aviation Civile (CAA) a trouvé les huit erreurs de maintenance courantes: installation incorrecte des composants, le montage de mauvaises pièces, les anomalies dans le câblage électrique, les objets perdus (outils, etc.) laissés dans l'avion, la lubrification inadéquate, la fermeture des capots, les accès aux panneaux et aux carénages non sécurisés, les bouchons de carburant et de ravitaillement non sécurisés et le verrouillage au sol du train d'atterrissage avec les broches non retirées avant le départ (UK CAA, 1992, cité dans Allen & Rankin, 1995). Il est intéressant de voir que cette diversité d’erreurs concerne des tâches aussi bien routinières que ponctuelles, soulevant ainsi un risque permanent dans le temps.

Pour comprendre l’origine de ces erreurs et conduire les investigations à la suite d’accidents ou d’incidents, de nombreux outils existent déjà tels que “Maintenance Error Decision Aid” (MEDA) (Allen & Rankin, 1995), “Human Factors Analysis and Classification System” (HFACS) (Shappell & Wiegmann, 2001), “Managing Engineering Safety Health” (MESH), Model of latent an active failure (Reason, 1990), “Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach » (SHERPA) (Embrey, 2009). Tous ces modèles ont la particularité de focaliser leur analyse sur l’erreur humaine plus que sur les conditions de travail, la sécurité et la santé de l’opérateur de maintenance. **Or, l’erreur humaine peut aussi être due aux conditions de travail d’un opérateur de maintenance, à sa sécurité et à sa santé.** Ainsi, nous pouvons proposer un futur axe majeur de recherches en couplant les analyses liées à la sécurité et à la santé de l’opérateur et celles concernant les erreurs humaines. En accord avec nos travaux actuels, il semble essentiel de s’intéresser à :

- L’anticipation des erreurs par la simulation ;
- La compréhension des erreurs de maintenance par la simulation.

Dans les deux cas l’enjeu est le même : produire des recommandations pour les bureaux d’études qui devront être respectées voire étendues aux autres aéronefs de technologie et/ou de situation de travail similaires. Nos travaux de recherche développés dans ce mémoire se sont donc focalisés sur l’anticipation de la santé et de la sécurité des opérateurs, ils pourraient être améliorés en vue de prendre en compte les erreurs humaines. La figure 71 explique cette future démarche potentielle :

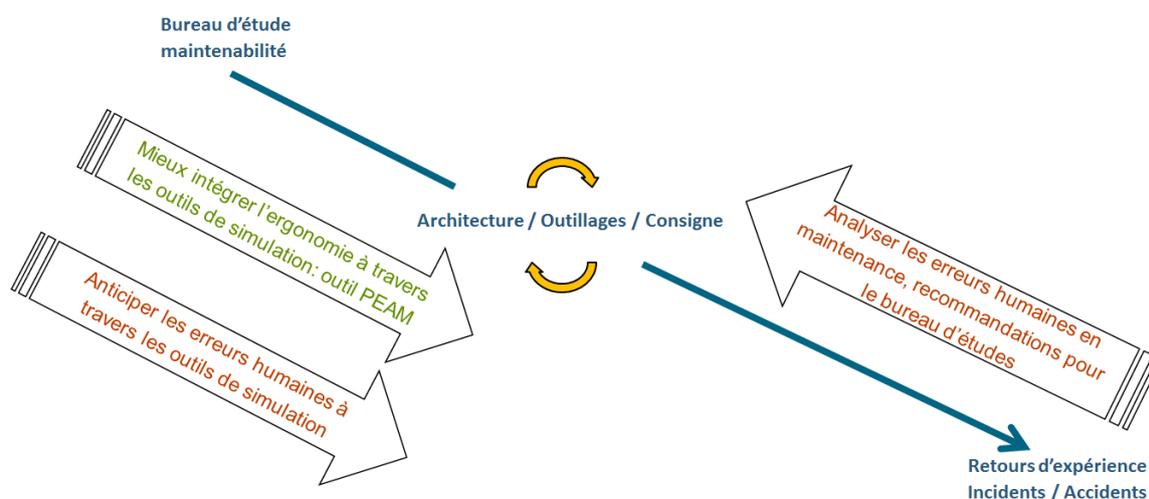


Figure 71 : Schématisation couplant la recherche actuelle (vert) et les axes futurs d’amélioration (orange) en tenant compte notamment des erreurs humaines en maintenance.

BIBLIOGRAPHIE

-A-

- Abdel-Malek, K., Yang, J., Kim, J., Marler, T., Beck, S., Swan, C., Frey-Law, L., Mathai, A., Murphy, C., Rahmatallah, S., and Arora, J., 2007. "Development of the virtual-human santos". In Digital Human Modeling, V. D. (Ed.), ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 490–499
- Abdullah, A. B., Hasim, M. H., Yusoff, M. S., Wahab, K. A., & Ripin, Z. M. (2007). Utilization of design for assembly guideline to enhance product maintainability. *Journal of Applied Sciences*, 7(21), 3234-3241.
- AFIM. Association française des ingénieurs et responsables de maintenance- santé et sécurité au travail : les métiers de la maintenance en première ligne. Guide nationale de la maintenance 2004.
- AFNOR, 1998. Recueil des normes françaises X06, X50, X60 (Norme).
- AFNOR, 2005. NF EN ISO 15537 : Principes de sélection et d'utilisation des personnes d'essai pour le contrôle des aspects anthropométriques des produits et modèles industriels (Norme).
- AFNOR, 2008. NF EN ISO 1005-4 : Sécurité des machines - Performance physique humaine - Partie 4 : Evaluation des postures et mouvements lors du travail en relation avec les machines (Norme).
- AFNOR, 2008. NF EN 547-2+A1 : Sécurité des machines – Mesures du corps humain – Partie 2 : Principes de détermination des dimensions requises pour les orifices d'accès (Norme)
- AFNOR, 2017. NF EN ISO 7250 : Définitions de la mesure de base du corps humain (Norme).
- AFNOR, 2017. NF EN 15341 : Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance (Norme).
- AFNOR, 2018. NF EN 13306 : Maintenance - Terminologie de la maintenance (Norme).
- Ahmed, S., Gawand, M. S., Irshad, L., & Demirel, H. O. (2018, August). Exploring the Design Space Using a Surrogate Model Approach With Digital Human Modeling Simulations. In ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference(pp. V01BT02A011-V01BT02A011). American Society of Mechanical Engineers.

Bibliographie

- Aittokoski T. (2007). "On optimization of simulation based design". Thesis Report. University of Jyväskylä, 113 pages.
- Allen Jr., J.P., Rankin, W.L., 1995. A summary of the use and impact of the Maintenance Error Decision Aid (MEDA) on the commercial aviation industry. In: Proceedings of the Flight Safety Foundation International Federation of Airworthiness 48th Annual International Air Safety Seminar. Flight Safety Foundation, Arlington, VA, pp. 359-369.
- Allen, I. E., & Seaman, C. A. (2007). Likert scales and data analyses. *Quality progress*, 40(7), 64-65.
- Al Khatib, A., Mahdjoub, M., Bluntzer, J., & Sagot, J-C (2001). Modifications interactives de prototype virtuel: utilisation des règles métiers ergonomiques. 6ème journées de l'Association Française de Réalité Virtuelle, Bidart (64),
- Amundarain, A., Borro, D., Matey, L., Alonso, A. G., & de Guipúzcoa, T. (2003). Occlusion Culling for the Visualization of Aeronautical Engines Digital Mock-ups. Proceedings of Virtual Concept, Biarritz, France, 5-7.
- Andersen, J. H., Kaergaard, A., Frost, P., Thomsen, J. F., Bonde, J. P., Fallentin, N. & Mikkelsen, S. (2002). "Physical, psychosocial, and individual risk factors for neck/shoulder pain with pressure tenderness in the muscles among workers performing monotonous, repetitive work." *Spine*, 27(6), 660-667.
- Anglin, J. M., Sugiyama, T., & Liew, S. L. (2017). Visuomotor adaptation in head-mounted virtual reality versus conventional training. *Scientific reports*, 7, 45469.
- Antonovsky, A., Pollock, C., & Straker, L. (2014). Identification of the human factors contributing to maintenance failures in a petroleum operation. *Human factors*, 56(2), 306-321.
- Aoussat, A., Christofol, H., Coq, M.L., 2000. The new product design - a transverse approach. *J. Eng. Des.* 11, 399-417. <https://doi.org/10.1080/09544820010000971>
- Aromaa, S., & Väänänen, K. (2016). Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied ergonomics*, 56, 11-18.
- Asadi, N., Choobineh, A., Keshavarzi, S., & Daneshmandi, H. (2015). Estimation of forces exerted on the lower back in manual load lifting using 3DSPP software. *Iranian Journal of Ergonomics*, 2(4), 25-31.
- Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6, 355-385.

Bibliographie

Azuma, R. T., Bailiot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 21, 34-47.

-B-

Baeumle, T., 2012. Concevoir des bâtiments accessibles pour tous: une approche méthodologique centrée utilisateur basée sur les outils de la réalité virtuelle. (phdthesis). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.

Baek, S. Y., & Lee, K. (2012). Parametric human body shape modeling framework for human-centered product design. *Computer-Aided Design*, 44(1), 56-67.

Bataille, C., et Galley, R. (2000) Rapport sur l'aval du cycle nucléaire, Députés 2000.

Barcellini, F., Van Belleghem, L. & Daniellou, F. Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In Falzon, P. (coord.) *Ergonomie constructive*. Presses Universitaires de France (2013), 191-206.

Bayramzadeh, S., Joseph, A., Allison, D., Shultz, J., Abernathy, J., & Group, R. O. S. (2018). Using an integrative mock-up simulation approach for evidence-based evaluation of operating room design prototypes. *Applied ergonomics*, 70, 288-299.

Bazzaro, F., Charrier, M., Sagot, J.-C., 2012. Design et ergonomie : facteurs d'innovation dans la conception. Presented at the Société d'Ergonomie de Langue Française, La Rochelle.

Béguin, P., & Weill-Fassina, A. (1997). De la simulation des situations de travail à la situation de simulation. *La simulation en ergonomie: connaître, agir et interagir*, 5-28.

Begur, Suhas H., and J. Ashok Babu. "Human Factors in Aircraft Maintenance." *Human Factors* 3.3 (2016).

Bellies, L., & François, C. (2016). L'accompagnement ergonomique d'un projet d'ingénierie de formation: outiller et accompagner les futurs formateurs pour transformer le travail. *Actes du*, 51.

Bellemare, M., Garrigou, A., Ledoux, E., Richard, J.-G. (1995). Les apports de l'ergonomie dans le cadre de projets industriels ou architecturaux. *Relations Industrielles*, 50, 4.

Belleghem, L. V. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique: acquis et perspectives. *Activités*, 15(15-1).

Bennes, L., Bazzaro, F., Sagot, J.-C., 2013. Systematic Development of Virtual Reality Convergence Support Tools Dedicated to Concurrent Product Design. *ASME*, p. 10. <https://doi.org/10.1115/DETC2013-12312>

Bibliographie

- Bennes, L., Bazzaro, F., Chevriau, S., & Sagot, J. C. (2014). "Virtual reality as a support tool for ergonomic-style convergence." *J. Virtual Real. Broadcast*, 11(5).
- Bergouignan, J. P. (2016). *La qualité de vie au travail. Qualité de vie au travail : négocier le travail pour le transformer, enjeux et perspectives d'une innovation sociale*, 85
- Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017, January). "Consideration of Human Factors in aeronautical maintainability". *Annual Reliability and Maintainability Symposium*. (IEEE.)
- Berrah, Lamia (2002). "L'indicateur de performance: Concepts et Applications. Cépadues-Editions
- Bertilsson, E., Högberg, D., & Hanson, L. 2010. *Digital human model module and work*
- Bhise, V. D. (2016). *Ergonomics in the automotive design process*. CRC Press.
- Birnbaum, Z. W. "On a use of the Mann-Whitney statistic." *Proceedings of the Third Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, Volume 1: Contributions to the Theory of Statistics*. The Regents of the University of California, 1956.
- Blanchard, B. S. (2014). *Maintainability In The Context Of Systems Engineering: Some Challenges For The Future*. *The Journal of Reliability, Maintainability & Supportability in Systems Engineering*, 11.
- Bobillier-Chaumon, M., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle: quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation? *Le Travail Humain*, 72(4), 355. <https://doi.org/10.3917/th.724.0355>
- Bonnardel, N. (2009). *Activités de conception et créativité: de l'analyse des facteurs cognitifs à l'assistance aux activités de conception créatives*. *Le travail humain*, 72(1), 5-22.
- Boothroyd, G., & Alting, L. (1992). *Design for assembly and disassembly*. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 41(2), 625-636.
- Borg, G. (1982). *Psychophysical bases of perceived exertion*. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 14, 377-381.
- Bortolini, M., Gamberi, M., Pilati, F., & Regattieri, A. (2018). *Automatic assessment of the ergonomic risk for manual manufacturing and assembly activities through optical motion capture technology*. *Procedia CIRP*, 72, 81-86.

Bibliographie

- Bourdot, P., Convard, T., Picon, F., Ammi, M., Touraine, D., & Vézien, J. M. (2010). VR–CAD integration: Multimodal immersive interaction and advanced haptic paradigms for implicit edition of CAD models. *Computer-Aided Design*, 42(5), 445-461.
- Boy, G. A. (2018, August). From Rigid to Flexible–From Virtual to Tangible an Evolution of Human-Centered Design. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 54-63). Springer, Cham.
- Boy, G.A.(2016). *Tangible Interactive Systems*. Springer, U.K.
- Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: how much immersion is enough?. *Computer*, 40(7).
- Brace, I., 2008. *Questionnaire Design: How to Plan, Structure and Write Survey Material for Effective Market Research*. Kogan Page Publishers.
- Bradburn et al., (2004). “Asking Questions: The Definitive Guide to Questionnaire Design : For Market Research, Political Polls, and Social and Health Questionnaires”
- Bradford, R. B., & Wnek, J. (2006). U.S. Patent No. 7,113,943. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Broberg, O. (2007). “Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists.” *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 17(4), 353-366.
- Broberg, O., Andersen, V., & Seim, R. (2011). Participatory ergonomics in design processes: The role of boundary objects. *Applied ergonomics*, 42(3), 464-472.
- Bronet, V. (2006). *Amélioration de la performance industrielle à partir d'un processus référent: déploiement inter entreprises de bonnes pratiques*, Université de Savoie.
- Burkhardt, J.-M., Lourdeaux, D., & Mellet d’Huart, D. (2003). La conception des environnements virtuels pour l’apprentissage. In Ph. Fuchs & G. Moreau (Eds.), *Le traité de réalité virtuelle* (pp. 207-296). Paris, France : Les Presses de l’École des Mines de Paris.
- Burkhardt, J. M. (2003). Réalité virtuelle et ergonomie: quelques apports réciproques. *Le travail humain*, 66(1), 65-91.
- Burns, A., Salter, T., Sugden, B., & Sutherland, J. (2018). Virtual reality environment with real world objects. U.S. Patent No. 9,865,089. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

-C-

- Cafakelli, E., Cain, W. S., & Stevens, J. C. (1977). "Effort of dynamic exercise: influence of load, duration, and task." *Ergonomics*, 20(2), 147-158.
- Carlile, P. R. (2004). Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries. *Organization science*, 15(5), 555-568.
- Carayon, P., Smith, M. J., & Haims, M. C. (1999). Work organization, job stress, and work-related musculoskeletal disorders. *Human factors*, 41(4), 644-663.
- Carayon, P., & Smith, M. J. (2000). "Work organization and ergonomics." *Applied ergonomics*, 31(6), 649-662.
- Causse, M., Chua, Z., Peysakhovich, V., Campo, N., & Matton, N. (2017). Mental workload and neural efficiency quantified in the prefrontal cortex using fNIRS. *Scientific reports*, 7(1), 5222.
- Caudell, T.P., Mizell, D.W.: Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In: *System Sciences, 1992. Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference (1992)*
- CEN/TC319.EN13306:2018, Maintenance-maintenance terminology. European Standard, Bruxelles 2018
- Chaffin, D. B. (2008). Digital human modeling for workspace design. *Reviews of human factors and ergonomics*, 4(1), 41-74.
- Chang, Yu-Hern, and Ying-Chun Wang. "Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians." *Safety science* 48.1 (2010): 54-62.
- Chaparro, A., Rogers, B., Hamblin C., Chaparro B., A Comparison of Three Evaluative Techniques for Validating Maintenance Documentation. Final Report, 2004.
- Charrier, M., Bazzaro, F., Sagot, J.-C., 2014. Ergonomie et design industriel au service de la conception pour tous : proposition méthodologique.
- Chauvin, C. (2010). Le facteur humain et la sécurité maritime. *Revue Maritime*, (489), 14.
- Chedmail, P., Maille, B., & Ramstein, E. (2002). État de l'art sur l'accessibilité et l'étude de l'ergonomie en réalité virtuelle. *Mécanique & industries*, 3(2), 147-152.

Bibliographie

- Chen, W., Chao, J. G., Zhang, Y., Wang, J. K., Chen, X. W., & Tan, C. (2017). Orientation Preferences and Motion Sickness Induced in a Virtual Reality Environment. *Aerospace medicine and human performance*, 88(10), 903-910.
- Chitescu, C., Galland, S., Gomes, S., & Sagot, J. C. (2003, May). Virtual reality within a human-centered design methodology. In 5th International Conference on Virtual Reality—Laval (pp. 99-104).
- Chitescu, L.C., 2005. Simulation en ergonomie: facteur d'innovation dans la conception de produits (phdthesis). Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy.
- Čokorilo, O. (2011). "Aircraft Performance: The Effects of the Multi Attribute Decision Making of Non Time Dependant Maintainability Parameters." *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 1(1), 42-48.
- Cox, L.A. Jr. (2008). What's Wrong with Risk Matrices?. *Risk Analysis*, Vol. 28, No. 2. doi:10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x
- Craig, A. B., Sherman, W. R., & Will, J. D. (2009). *Developing virtual reality applications: Foundations of effective design*. Morgan Kaufmann.
- Creutzmacher, T., Berger, U., Lepratti, R., & Lamparter, S. (2016). The transformable factory: adapting automotive production capacities. *Procedia CIRP*, 41, 171-176.
- Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Fragos, D., & Karabatsou, V. (2000). A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4), 267-276.

-D-

- Daniellou, F. (1987). Les modalités d'une ergonomie de conception : introduction dans la conduite de projets industriels. *Note documentaire*, ND 1647-129-87, Paris, INRS.
- Daniellou, F., Garrigou, A., Kerguelen, A., & Laville, A. (1990). "Taking future activity in account at the design stage: participative design in the printing industry. In *Work design in practice, Proceedings of the Third.*" International Occupational Ergonomics Symposium Zadar (pp. 189-196).
- Daniellou, F., Naël, M. (1995). *Ergonomie*. Dans *Traité de Génie industriel*, Paris, Techniques de l'ingénieur.
- Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. @ ctivités, 4 (2), 77-83.

Bibliographie

- Da Costa, B. R., & Vieira, E. R. (2010). Risk factors for work-related musculoskeletal disorders: a systematic review of recent longitudinal studies. *American journal of industrial medicine*, 53(3), 285-323.
- Darses, F., Détienne, F., & Visser, W. (2001). Assister la conception: perspectives pour la psychologie cognitive ergonomique. *ÉPIQUE 2001, Actes des journées d'étude en psychologie ergonomique*, 11-20.
- Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: a systematic ergonomics approach. *Applied Ergonomics*, 27(3), 157-163.
- David, G., Woods, V., Li, G., & Buckle, P. (2008). The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Applied ergonomics*, 39(1), 57-69.
- Davis, K.G., Heaney, C.A., 2000. The relationship between psychosocial work characteristics and low back pain: underlying methodological issues. *Clinical biomechanics* 15, 389-406.
- Dhillon, B. S., and Y. Liu (2006). "Human error in maintenance: a review." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12.1, 21-36.
- De Leon, Pedro Moreu, et al. "A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes." *Reliability Engineering & System Safety* 100 (2012): 84-92
- De Sa, A. G., & Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, 23(3), 389-403.
- Di Gironimo, G., Monacelli, G., & Patalano, S. (2004). "A design methodology for maintainability of automotive components in virtual environment." In *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*.
- Ding, Y. (2009). Product maintainability design method and support tool based on feature model. *Journal Software Engineering & Applications*, 2, pp 165-172.
- Dmitriev, S., Burlakov, V., Popov, O., & Popov, D. (2015). Technological processes and quality control in aircraft engine maintenance. *Aviation*, 19(3), 133-137.
- Dubey, G. (1997). Faire «comme si» n'est pas faire. *La Simulation en Ergonomie: connaître, agir et interagir*, 39-53.
- Duchamp, R., 1988. *La conception de produits nouveaux*. Hermès, Paris.
- Duchamp, R. (1999). *Méthode de conception des produits nouveaux*. Paris: Hermès-Lavoisier.

Bibliographie

Duffy, Vincent G. Handbook of digital human modeling: research for applied ergonomics and human factors engineering. CRC press, 2016.

Dugué, B., Petit, J., & Daniellou, F. (2010). L'intervention ergonomique comme acte pédagogique. Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, (12-3).

-E-

EASA. Annex to ED Decision 2011/004/R, Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25), Ammendment 11. European Aviation Safety Authority (EASA), 4 July 2011.

Embrey, D. E. (1986). SHERPA: A systematic human error reduction and prediction approach. In Proceedings of the international topical meeting on advances in human factors in nuclear power systems.

European Agency for safety and Health at work, 2010b. Safe maintenance in practice. Luxembourg, Publications Offices of the European Union, 102 p.

-F-

FAA. FAR Part 25, Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes, Federal Aviation Regulation (FAR), Title 14, Code of Federal Regulations (CFR). Accessed on 10 January 2012.

Fadier, E. (1997). L'intégration des facteurs humains à la conception. Phoebus, spécial sur le Facteur Humain, 59-78.

Falzon, P. (1998). Qu'est-ce que la recherche en Ergonomie. Deuxièmes journées Recherche et ergonomie" l'ergonomie, les sciences cognitives, l'ergonomie et les sciences de l'Homme, qu'est-ce que la recherche en ergonomie, 9-11.

Falzon, P. (1996). Des objectifs de l'ergonomie. L'ergonomie en quête de ses principes, 233-242.

Falzon, P. (2004). Ergonomie. Presses universitaires de France.

Faverge J.M. (1970). L'homme agent d'infiabilité et de fiabilité du processus industriel. Ergonomics, 13, 3, 301-327.

Fédération française automobile club, Budget annuel de l'automobiliste, 2002.

Bibliographie

Fenix, J.-G., 2008. Conception centrée sur l'opérateur final : application à la conception d'une interface d'aide à la conduite ferroviaire (phdthesis). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - Université de Franche-Comté, Besançon.

Fenneteau, H., 2015. Enquête et questionnaire - 3e édition, 3e édition. ed, Les topos. Dunod.

Ferguson, S. A., & Marras, W. S. (1997). A literature review of low back disorder surveillance measures and risk factors. *Clinical Biomechanics*, 12(4), 211-226.

Fiorentino, M., Radkowski, R., Boccaccio, A., & Uva, A. E. (2016, June). Magic Mirror Interface for Augmented Reality Maintenance: An Automotive Case Study. In *Proceedings of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*(pp. 160-167). ACM.

Fleischer, J., Weismann, U., & Niggeschmidt, S. (2006). "Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements." *Proceedings of LCE*, 675-680.

-G-

Gallagher, S., Sesek, R. F., Schall Jr, M. C., & Huangfu, R. (2017). Development and validation of an easy-to-use risk assessment tool for cumulative low back loading: The Lifting Fatigue Failure Tool (LiFFT). *Applied ergonomics*, 63, 142-150.

Ganier, F., Hoareau, C., & Devillers, F. (2013). Évaluation des performances et de la charge de travail induits par l'apprentissage de procédures de maintenance en environnement virtuel. *Le travail humain*, 76(4), 335-363.

Ganier, F. (2018). *Comprendre la documentation technique*. Presses universitaires de France.

Garrigou A., Carballada G., Daniellou F. (1998). The role of « know-how » in maintenance activities and reliability in a high-risk process control plant. *Applied Ergonomics*, 29, 2, 127-131.

Garrigou, A., Thibault, J. F., Jackson, M., & Mascia, F. (2001). Contributions et démarche de l'ergonomie dans les processus de conception. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (3-2).

Garza, L.E, Pantoja, G., Ramirez, P., Ramirez, H., Rodriguez, N., Gonzalez, E., Quintal, R., Perez, J.A. (2013). "Augmented Reality Application for the Maintenance of a Flapper Valve of a Fuller-Kynion Type M Pump". *Procedia Computer Science* 25, pp 154 – 160.

Gavish, N., Gutiérrez, T., Webel, S., Rodríguez, J., Peveri, M., Bockholt, U., & Tecchia, F. (2015). Evaluating virtual reality and augmented reality training for industrial maintenance and assembly tasks. *Interactive Learning Environments*, 23(6), 778-798.

Bibliographie

- Gauzente, C. (2000). Mesurer la performance des entreprises en l'absence d'indicateurs objectifs: quelle validité? Analyse de la pertinence de certains indicateurs. *Finance Contrôle Stratégie*, 3(2), 145-165.
- Geng, J., Zhou, D., Lv, C., & Wang, Z. (2013). A modeling approach for maintenance safety evaluation in a virtual maintenance environment. *Computer-Aided Design*, 45(5), 937-949
- Gherbi R, Bourdot B, Vezien JM, Herisson J, Fauvet N, Ferey N (2006) Le traité de la réalité virtuelle, vol 4: Les applications de la Réalité Virtuelle. In: Fuchs P, Moreau G, Papin J-P (eds) Chapter 4: Explorations de données scientifiques et expérimentations virtuelles. Presses de l'Ecoles de Mines de Paris
- Gilbert, P. (1980). Le contrôle de gestion dans les organisations publiques. Paris, Editions d'Organisation.
- Gomes, S., 1999. Contribution de l'analyse de l'activité au processus de conception de produits innovants. Application à la conception d'organes de commande automobiles (phdthesis). Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy.
- Grabener T., Berro A. (2008). "Optimisation multi-objectif discrète par propagation de contraintes". 4th JFPC (Journées Francophones de Programmation par Contraintes), Nantes, France.
- Graeber, R.C., Marx, D.A., 1993. Reducing human error in aircraft maintenance operations. In: Proceedings of the Flight Safety Foundation International Federation of Airworthiness 46th Annual International Air Safety Seminar. Flight Safety Foundation, Arlington, VA, pp. 147-160.
- Grusenmeyer C. (2000a). Interactions maintenance-exploitation et sécurités. Etude bibliographique. 1. Les tâches de maintenance : définitions et caractéristiques contribuant à leur criticité. Les notes Scientifiques et Techniques de l'INRS, 188, 46 p.
- Guerlesquin, G., 2012. Articulation Ergonomie - Design - Conception Mécanique : Approche Méthodologique de la Convergence Multidisciplinaire (phdthesis). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Gynn, M., & Steele, J. (2015). Virtual Automotive Maintenance and Service Confirmation (No. 2015-01-0498). SAE Technical Paper.

-H-

- Hashim, N., Kamat, S. R., Halim, I., & Othman, M. S. (2014). A study on push-pull analysis associated with awkward posture among workers in aerospace industry. *Age*, 25, 5-0.
- Hägg, G. M. (2003). Corporate initiatives in ergonomics—an introduction.

Bibliographie

- Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.
- Hauret, D., Donnot, J., & Van Belleghem, L. (2016). Intégration de la simulation de l'activité sur support tangible dans le processus de conception de l'interface homme-système du Rafale. In Communication présentée à la 15^{ème} Conférence Ergo'IA.
- Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Hobbs, A.N., Maintenance 'error', lessons from the BASI survey, *Flight Safety Australia*, 4, , p. 36-37, 2000.
- Hobbs, Alan, and Ann Williamson. "Associations between errors and contributing factors in aircraft maintenance." *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 45.2 (2003): 186-201.
- Holt, P.O., Ritchie, J.M., Day, P.N., Simmons, J.E.L., Robinson, G., Russell, G.T., Ng, F.M. (2004): Immersive virtual reality in cable and pipe routing: design metaphors and cognitive ergonomics. *Journal of Computing and Information Science in Engineering* 4(3), 161–170
- Horeman, T., Akhtar, K., & Tuijthof, G. J. (2015). Physical Simulators. In *Effective Training of Arthroscopic Skills* (pp. 57-69). Springer Berlin Heidelberg.
- Hoyos-Ruiz, J., Martínez-Cadavid, J. F., Osorio-Gómez, G., & Mejía-Gutiérrez, R. (2017). Implementation of ergonomic aspects throughout the engineering design process: human-artefact-context analysis. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11(2), 263-277.
- Huang, G.Q., Mak, K.L. (1997). "The DFX shell: A generic framework for developing design for X tools". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 13(3), pp 271-280.

-I-

In Dessaigne, M.F., Pueyo, V. et Béguin, P. (coord.) *Innovation et travail. Sens et valeurs du changement. Actes du 47^{ème} congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française du 5, 6 et 7 septembre 2012.* France, Lyon, Editions du Gerra.

Iribarne, Philippe (1996). *Vous serez tous des maîtres*, Paris, Seuil.

-J-

Jayaram, U., Jayaram, S., Shaikh, I., Kim, Y.J. & Palmer, C. (2006). Introducing quantitative analysis methods into virtual environments for real-time and continuous ergonomic evaluations. *Computers in Industry* 57, 283-296.

Jerald, J. (2015). *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool.

-K-

Kaljun, J., Dolšak, B. (2012). "Ergonomic design knowledge built in the intelligent decision support system International". *Journal of Industrial Ergonomics*, 42, pp 162 -170.

Kang, K. T., Koh, Y. G., Son, J., Jung, M., Oh, S., Kim, S. J., & Kim, S. H. (2018). Biomechanical influence of deficient posterolateral corner structures on knee joint kinematics: A computational study. *Journal of Orthopaedic Research®*.

Karasek, R. A., Jr. (1979). Job demands, job decision latitude, and mental strain: Implications for job redesign. *Administrative Science Quarterly*, 24, 285–308. <https://doi.org/10.2307/2392498>

Karsh, B.-T., 2006. Theories of work-related musculoskeletal disorders: Implications for ergonomic interventions. *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 7, 71-88.

Kausalya, R., & Srinivasan, V. (2012, June). "Need for health awareness training program for employees in Indian Industries." In *Technology Management Conference (ITMC), 2012 IEEE International* (pp. 144-150). IEEE

Klussmann, A., Steinberg, U., Liebers, F., Gebhardt, H., & Rieger, M. A. (2010). The Key Indicator Method for Manual Handling Operations (KIM-MHO)-evaluation of a new method for the assessment of working conditions within a cross-sectional study. *BMC musculoskeletal disorders*, 11(1), 272.

Klussmann, A., Liebers, F., Brandstädt, F., Schust, M., Serafin, P., Schäfer, A. & Steinberg, U. (2017). Validation of newly developed and redesigned key indicator methods for assessment of different working conditions with physical workloads based on mixed-methods design: a study protocol. *BMJ open*, 7(8), e015412.

Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*

Krulak, David C. "Human factors in maintenance: impact on aircraft mishap frequency and severity." *Aviation, space, and environmental medicine* 75.5 (2004): 429-432.

Bibliographie

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.

-L-

Lallemand, C., & Gronier, G. (2018). *Méthodes de design UX: 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs*. Editions Eyrolles.

Lambert, R. (2013). *L'importance de l'approche qualité dans la mise en place et la réalisation d'un projet pharmaceutique: Exemple d'Application des Méthodes d'Amélioration Continue pour Affiner la Traçabilité des Produits sur un Site Dépositaire Pharmaceutique* (Doctoral dissertation, Université de Lorraine).

Land, J., & Weitzman, C. (1995). How HUMS systems have the potential of significantly reducing the direct operating cost for modern helicopters through monitoring. In *ANNUAL FORUM PROCEEDINGS-AMERICAN HELICOPTER SOCIETY* (Vol. 51, pp. 744-744). AMERICAN HELICOPTER SOCIETY

Langley, A., Lawson, G., Hermawati, S., D'Cruz, M., Apold, J., Arlt, F., & Mura, K. (2016). Establishing the Usability of a Virtual Training System for Assembly Operations within the Automotive Industry. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 26(6), 667-679.

Laring, J., Forsman, M., Kadefors, R., & Örtengren, R. (2002). MTM-based ergonomic workload analysis. *International journal of Industrial ergonomics*, 30(3), 135-148

Latorella, K. A., & Prabhu, P. V. (2000). A review of human error in aviation maintenance and inspection. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(2), 133-161.

Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer. *Applied ergonomics*, 53, 323-330.

Lebahar, J. C. (1998). La simulation comme instrument de représentation et de régulation dans la conception de produit. *La simulation en ergonomie: connaître, agir et interagir*, 77-96.

Lee, S. G., Ma, Y. S., Thimm, G. L., & Verstraeten, J. (2008). Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul. *Computers in industry*, 59(2), 296-303.

Leonard, D. (1995). *Wellspring of knowledge*. Boston: Harvard Business School.

Lehtonen M. (2006). "Simulation-based design process of smart machines". Espoo 2006. VTT Tiedotteita. Research Notes 2349. 184 pages.

Bibliographie

- Leplat, J. (1985). Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail. A. Colin.
- Li, G., & Buckle, P. (1999). Current techniques for assessing physical exposure to work - related musculoskeletal risks, with emphasis on posture - based methods. *Ergonomics*, 42(5), 674–965. <https://doi.org/10.1080/001401399185388>
- Lockett, H. L., & Arvanitopoulos-Darginis, K. (2017). An Automated Maintainability Prediction Tool Integrated with Computer Aided Design. *Procedia CIRP*, 60, 440-445.
- Loomis, J. M., & Philbeck, J. W. (2008). Measuring spatial perception with spatial updating and action. In *Carnegie Symposium on Cognition, 2006*, Pittsburgh, PA, US. Psychology Press.
- Lorisson, J. (2006). Discussions et débats Conférence SIA – « La réalité virtuelle aujourd’hui dans l’automobile, applications dans la conception produit/process ». ADN – PSA Peugeot-Citrën Velizy
- Lorisson, J. (2010). Réalité virtuelle dans l’industrie-Développement des produits et des processus. *Techniques de l’ingénieur TE*, 5, 965.
- Loup-Escande, É., Burkhardt, J. M., & Richir, S. (2013). Anticiper et évaluer l'utilité dans la conception ergonomique des technologies émergentes: une revue. *Le travail humain*, 76(1), 27-55.
- Lu, M. L., Waters, T., & Werren, D. (2015). Development of human posture simulation method for assessing posture angles and spinal loads. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 25(1), 123-136.
- Lux, A., Mawo De Bikond, J., Etienne, A., & Quillerou-Grivot, E. (2016). FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 22(4), 557-564.

-M-

- Maline, J., & Preto, J. (1994). *Simuler le travail: une aide à la conduite de projet*. Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail.
- Mahdjoub, M., 2007. *La Réalité Virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur* (phdthesis). Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- Mahdjoub, M., Bazzaro, F., Wind, L., Sagot, J.-C., 2008. A human centered collaborative design methodology, in: *Proceedings of the 9th International Congress of Physiological Anthropology*. Presented at the International Congress of Physiological Anthropology (ICPA), Delft, Netherlands, p. 5.

Bibliographie

- Mahdjoub, M. Monticolo, D. Gomes, S. and Sagot, J.C. (2010). "A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment". *Computer-Aided Design*, 42, pp 402 – 413.
- Mahdjoub, M., Al Khatib, A., Bluntzer, J. B. & Sagot, J. C. (2013). Multidisciplinary convergence about "product-use" couple: Intermediary object's structure. In *DS 75-5: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies*, Vol. 5: Design for X, Design to X, Seoul, Korea 19-22.08. 2013.
- Mandrick, K., Peysakhovich, V., Rémy, F., Lepron, E., & Causse, M. (2016). Neural and psychophysiological correlates of human performance under stress and high mental workload. *Biological psychology*, 121, 62-73.
- Marras, W. S., Ferguson, S. A., Gupta, P., Bose, S., Parnianpour, M., Kim, J. Y., & Crowell, R. R. (1999). The quantification of low back disorder using motion measures: Methodology and validation. *Spine*, 24(20), 2091.
- Martin C., Baradat D. (2003). *Des pratiques en réflexion*. Éditions Octarès, Toulouse.
- Marzano, A., Friel, I., Erkoyuncu, J. A., & Court, S. (2015). Design of a Virtual Reality Framework for Maintainability and Assemblability Test of Complex Systems. *Procedia CIRP*, 37, 242-247.
- McDonald, N., Corrigan, S., Daly, C., & Cromie, S. (2000). Safety management systems and safety culture in aircraft maintenance organisations. *Safety Science*, 34(1), 151-176.
- McAtamney, L., & Corlett, E. N. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied ergonomics*, 24(2), 91-99.
- Mechin, B. (2007). *Maintenance: concepts et définitions*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Meier, P., & Holzer, S. (2015). U.S. Patent No. 9,165,405. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Meister, D. (2014). *Human factors testing and evaluation (Vol. 5)*. Elsevier.
- Menezes, P., Gouveia, N., & Patrão, B. (2018). Touching is believing-Adding real objects to Virtual Reality. In *Online Engineering & Internet of Things* (pp. 681-688). Springer, Cham.
- Merriam-Webster: Merriam-Webster dictionary online. Virtual reality entry (2018).
- MIL-STD-1472G (2012), DEPARTMENT OF DEFENSE DESIGN CRITERIA STANDARD: HUMAN ENGINEERING (Norme)

Bibliographie

Mishra, R. P., Anand, G., & Kodali, R. (2008). A SWOT analysis of total productive maintenance frameworks. *International Journal of Management Practice*, 3(1), 51-81.

Misra, K. B. (2008). Maintenance engineering and maintainability: An introduction. In *Handbook of performability engineering* (pp. 755-772). Springer London.

Molenbroek, J., & de Bruin, R. 2005. Enhancing the use of anthropometric data. *Human Factors in Design, Safety, and Management*, 289-297.

Molenbroek, J., & de Bruin, R. 2006. Anthropometry of a friendly rest room. *Assistive Technology*, 18(2), 196-204.

Monchy, F. (1987). *La fonction maintenance: Formation à la gestion de la maintenance industrielle*. Masson.

-N-

Neumann, W. P., Ekman, M., & Winkel, J. (2009). Integrating ergonomics into production system development—The Volvo Powertrain case. *Applied Ergonomics*, 40(3), 527-537.

Nishanth, R., Muthukumar, M. V., & Arivanantham, A. (2015). "Ergonomic Workplace Evaluation for Assessing Occupational Risks in Multistage Pump Assembly." *International Journal of Computer Applications*, 113(9).

Nottingham, C. R., Ortega, R. A., Rangarajan, B., Koch, P.N., Mistree, F., Designing for maintainability in preliminary aircraft engine design. *Proceedings of The 1997 Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*. September 14-17, 1997, Sacramento, CA.

-O-

Occhipinti, E. (1998). OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9), 1290-1311.

-P-

Palmarini, R., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., & Torabmostaedi, H. (2018). A systematic review of augmented reality applications in maintenance. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 49, 215-228.

Parsons, K.C (2000). "Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models." *Applied ergonomics*, 31(6), 581-594

Bibliographie

- Perez, J., de Looze, M. P., Bosch, T., & Neumann, W. P. (2014). Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(2), 298-306.
- Perez, J., & Neumann, W. P. (2010). "The Use of Virtual Human Factors Tools in Industry—A Workshop Investigation." Ryerson University, Human Factors Engineering Lab Technical Report, 3.
- Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., & Papageorgiou, L. G. (2000). Process design for maintainability: an optimization approach. *Computers & Chemical Engineering*, 24(2), 203-208.
- Plantard, P., Shum, H. P., Le Pierres, A. S., & Multon, F. (2017). Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions. *Applied ergonomics*, 65, 562-569.
- Poirson, E., & Delangle, M. (2013, June). Comparative analysis of human modeling tools. In *International Digital Human Modeling Symposium*.
- Pontonnier, C., Dumont, G., Samani, A., Madeleine, P., & Badawi, M. (2014). Designing and evaluating a workstation in real and virtual environment: toward virtual reality based ergonomic design sessions. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 8(2), 199-208.

-Q-

- Quarante, D (1994). *Éléments de design industriel*. Polytechnica, Paris, 645p
- Quarante, D., Denielou, G., 2001. *Éléments de design industriel*. Polytechnica : Diff. Economica, Paris.

-R-

- Rabardel, P., Carlin, N., & Chesnais, M. (2014). *Ergonomie: concepts et méthodes*.
- Ranger, F (2017). *Ergonomie de produits : Cartographie de l'activité de dimensionnement chez les designers industriels*, thèse de doctorat.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
- Rasmussen, J. (1982). Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. *Journal of occupational accidents*, 4(2-4), 311-333.

Bibliographie

- Rasmussen, J., Damsgaard, M., Christensen, S.T., Surma, E. (2002). Design optimization with respect to ergonomic properties. *J Structural and Multidisciplinary Optimization*, 24, 89-97, doi: 10.1007/s00158-002-0219-x
- Rasmussen, J., & de Zee, M. (2008). Design optimization of airline seats. *SAE International Journal of Passenger Cars-electronic and electrical systems*, 1(2008-01-1863), 580-584.
- Reason, J., & Hobbs, A. (2003). *Managing maintenance error: A practical guide*. Aldershot, UK: Ashgate.
- Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital Human Models and Virtual Ergonomics to Improve Maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(1), 10-19.
- Rice, S. (2004). Boeing human modeling system.
- Richir, S. (2003). *Les technologies de la réalité virtuelle pour la conception de produits*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université d'Angers.
- Riley, S. (2016). U.S. Patent No. 9,403,087. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Robson, L.S, Clarke, J.A., Cullen, K., Bielecky, A., Severin, C., Bigelow, P.L, Irvin, E., Culyer, A., Mahood, Q. 2007. The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: A systematic review. *Safety Science* 45, pp.329-353.
- Rogan, E., 1995a. MESH: Managing Engineering Safety Health. *Human Factors* 2, 5}6. British Airways Engineering, London.
- ROGER M., BLUNTZER J.B., MAHDJOUR M. (2014). Intégration de l'ergonomie dans le processus de conception de véhicules spéciaux à l'aide d'un simulateur évolutif d'architectures d'habitacles. 14th Ergo'IA Conference, 15th-17th Octobre, Biarritz (64), 8p.
- Roger M, Vignais N, Ranger F, Sagot JC (2018) Physical Ergonomic Testing for the Design of an Innovative Mail Delivery Vehicle: A Physical Mock-up Case Study. *J Ergonomics* 7: 228. DOI: 10.4172/2165-7556.1000228
- Roquelaure Y, Promoting a shared representation of workers' activities to improve integrated prevention of work-related musculoskeletal disorders, *Safety and Health at Work*(2016), doi: 10.1016/j.shaw.2016.02.001.
- Rui, L., Chuan, L., Yingzhi, Z., & Dong, Z. (2009, August). The preliminary study on the human-factor evaluation system for maintainability design. In *Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2009. IHMSC'09. International Conference on* (Vol. 2, pp. 107-112). IEEE.

- Sagot, J.C., Gouin, V. and Gomes, S. Ergonomics in product design: safety factor. *Safety Science* 2003, 41(2-3),137 – 154.
- Sagot, J. C. (1999). Ergonomie et conception anthropocentrée. Document pour l’Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, 21.
- Salvendy, G. (2012). “Handbook of human factors and ergonomics.” John Wiley & Sons.
- Santos, R., Teixeira, P. F., & Antunes, A. P. (2015). Planning and scheduling efficient heavy rail track maintenance through a Decision Rules Model. *Research in Transportation Economics*, 54, 20-32.
- Satheeshkumar, M., & Krishnakumar, K. (2014). Digital Human Modeling Approach in Ergonomic Design and Evaluation-A Review. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(7), 2229-5518.
- Savall, J., Borro, D., Gil, J. J., & Matey, L. (2002). Description of a haptic system for virtual maintainability in aeronautics. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 3, pp. 2887-2892). IEEE.
- Schaub, K. G., Mühlstedt, J., Illmann, B., Bauer, S., Fritzsche, L., Wagner, T. & Bruder, R. (2012). Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the ‘ergonomics assessment worksheet’(EAWS). *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 3(3-4), 398-426.
- Sen, S., Gibson, Z., Butterfield, J., Rodger, M., Murphy, B. T., & Marzano, A. (2018). Understanding Human Behaviour In Virtual Reality Environments. 119-127. Paper presented at 35th International Manufacturing Conference , Dublin, Ireland.
- Seth, A., Vance, J.M., Oliver, J.H. (2011). “Virtual reality for assembly methods prototyping: a review”. *Virtual reality*. 15-1, pp 5-20.
- Serghides, V. C., & Fielding, J. P. (1987). A maintainability prediction methodology for use in aircraft design. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 4(1), 9-18.
- Shanmugam, A., and T. Paul Robert. "Human factors engineering in aircraft maintenance: a review." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21.4 (2015): 478-505.
- Shaikh, I., Kim, Y., Jayaram, U. & Choi H. (2003). Integration of immersive environment and RULA for real time study of workplace related musculoskeletal disorders in the upper limb. *ASME Proceedings of DETC2003*, Chicago, IL, USA

Bibliographie

- Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2001). Applying reason: The human factors analysis and classification system (HFACS). *Human Factors and Aerospace Safety*.
- Shephard, M. S., Beall, M. W., O'bara, R. M., & Webster, B. E. (2004). Toward simulation-based design. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(12), 1575-1598.
- Shi, Yongsheng, and Yu Liu. "Application of DELMIA on Maintainability Design of Aircraft." *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. Atlantis Press, 2012.
- Singh, A. S. (2017). Common procedures for development, validity and reliability of a questionnaire. *International Journal of Economics, Commerce and Management*, 5(5), 790-801.
- Smith, T. M. (1976). Project Whirlwind: An Unorthodox Development Project. *Technology and Culture*, 447-464.
- Smith, David J. *Reliability, Maintainability and Risk 8e: Practical Methods for Engineers Including Reliability Centred Maintenance and Safety-Related Systems*. Elsevier, 2011.
- Sperandio, J. C. (2015). *La psychologie en ergonomie*. FeniXX.
- Strauch, B. (2017). *Investigating human error: Incidents, accidents, and complex systems*. CRC Press.

-T-

- Terrade, F., Pasquier, H., Boulanger, J., Guingouain, G., & Somat, A. (2009). L'acceptabilité sociale: la prise en compte des déterminants sociaux dans l'analyse de l'acceptabilité des systèmes technologiques. *Le Travail Humain*, 72(4), 383–395. <https://doi.org/10.3917/th.724.0383>
- Theureau, J. (1997). L'utilisation des simulateurs de salle de contrôle de réacteur nucléaire et de cockpit d'avion à des fins autres que de formation: présentation et discussion des tendances actuelles.
- Thibault, Jean-François, Xavier Merlin, and Alain Garrigou. "De la production à l'usage de la mesure, quelle appropriation par deux entreprises industrielles? Pour quelle prévention des TMS?." *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé* 15-2 (2013).
- Tichkiewitch (1994) « De la CFAO à la conception intégrée », dans « *International Journal of CAD/CAM and computer graphics* », vol.9, n°5, pp. 609-62.
- Toulouse, P. (1981). Prise en compte de la fiabilité humaine dans la conception des avions civils. *Revue générale nucléaire*, (5), 424-429.

Bibliographie

- Zafiharimalala, H., & Tricot, A. (2009). Vers une prise en compte de l'utilisateur dans la conception de documents en maintenance aéronautique. Actes PeCUSI09.63.
- Trout, T. T., Russell, S., Harrison, A., Dennison, M., Spicer, R., Rosenberg, E. S., & Thomas, J. (2018, April). Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making. In Next-Generation Analyst VI (Vol. 10653, p. 106530N). International Society for Optics and Photonics.
- V-
- Van Belleghem, L. (2012) Simulation organisationnelle : innovation ergonomique pour innovation sociale, SELF
- Van Belleghem, L., & Guerry, M. H. (2016). De la simulation organisationnelle à la simulation managériale. Actes du 51ème congrès de la SELF, 21-23.
- Van der Meulen, P., and Seidl, A., 2007. "Ramsis – the leading cad tool for ergonomic analysis of vehicles". In Digital Human Modeling, V. D. (Ed.), ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1008–1017.
- Van Horenbeek, A. (2013). Information-based maintenance optimization with focus on predictive maintenance. Heverlee, Belgium.
- Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2014). Development of a maintenance performance measurement framework—using the analytic network process (ANP) for maintenance performance indicator selection. *Omega*, 42(1), 33-46.
- Varret, A., & Mahdjoub, M. (2013). Innovative teaching approach for the design process of mechanical products. In DS 75-8: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol. 8: Design Education, Seoul, Korea, 19-22.08. 2013.
- VIGNAIS N., ROGER M., MAYSSE J., BAUME H., SAGOT JC. (2016). Ergonomic analysis of egress/ingress postures for véhicule design : digital prototype vs. Physical mockup. The 4th International Digital Human Modeling conference (DHM2016), June, 15-17, Montréal, Canada, 6p
- Vignais, N., Bernard, F., Touvenot, G., & Sagot, J. C. (2017). Physical risk factors identification based on body sensor network combined to videotaping. *Applied ergonomics*, 65, 410-417.
- Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(1), 51-72.

-W-

Wann, C. (2014), System(s) integration, The journal of RMS in systems engineering, 6-10

Wang, R., Yao, J., Wang, L., Liu, X., Wang, H., & Zheng, L. (2017, March). A surgical training system for four medical punctures based on virtual reality and haptic feedback. In 3D User Interfaces (3DUI), 2017 IEEE Symposium on (pp. 215-216). IEEE.

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.

Wu, X., & Fei, G. (2011, August). Research of Virtual reality technology in Automotive engine Assembly teaching. In Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2011 6th IEEE Joint International (Vol. 1, pp. 167-169). IEEE.

-Y-

Yannou B., Simpson T.W., Barton R.R., "Towards a conceptual design explorer using metamodeling approaches and constraints programming" , DETC2003 / DAC48766

Yongsheng, S., & Yu, L. (2012) Application of DELMIA on Maintainability Design of Aircraft. Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling, 4p.

Young, M. S. & Stanton, N. A. (2002). Malleable attentional resources theory: A new explanation for the effects of mental underload on performance. *Human Factors*, 44 (3), 365-375.

-Z-

Zare, M., Biau, S., Brunet, R., & Roquelaure, Y. (2017). Comparison of three methods for evaluation of work postures in a truck assembly plant. *Ergonomics*, 60(11), 1551-1563.

Zare, M., Sagot, J. C., & Roquelaure, Y. (2018). Within and between Individual Variability of Exposure to Work-Related Musculoskeletal Disorder Risk Factors. *International journal of environmental research and public health*, 15(5), 1003.

Zou, Y., Zhang, L., Dai, L., Li, P., & Qing, T. (2017). Human reliability analysis for digitized nuclear power plants: case study on the LingAo II nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Technology*, 49(2), 335-341.

Zwingelstein, G. (1995). *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès.

Bibliographie

Zwingelstein, G. (1996). La maintenance basée sur la fiabilité. Hermès, 199.

Zwingelstein, G. (2009). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels complexes-Principaux concepts.

Zwolinski, P., 1999. La simulation de l'activité comme outil d'aide à la conception et à l'innovation : application à la conception du poste de conduite des TGV futurs (phdthesis). Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Illustration simplifiée du processus de développement et de conception de produits, processus qui se veut coopératif et rétroactif, selon Sagot et al. (1998, 2003).	22
Figure 2 : Présentation des principaux éléments composant un hélicoptère (exemple du H145, catégorie médium ; 3,6 tonnes ; longueur 10,20 mètres ; hauteur 3,96 mètres).	25
Figure 3 : Représentation schématique de l'organisation de notre mémoire de thèse.	32
Figure 4 : Processus théorique de la maintenance: dissociant maintenance corrective et préventive (figure adaptée sur la base des travaux de Zwingelstein, 1996). Il convient de noter que la maintenance préventive déclenchée selon un nombre de cycles est la plus répandue car ne nécessitant pas de vérifications de critères, obligeant à une surveillance supplémentaire. La maintenance corrective intervient quasi systématiquement après une défaillance.	40
Figure 5 : Organisation générale de la maintenance dans le domaine de l'aéronautique ; graphe français et adapté de "Aviation Maintenance Management" by Harry & Kinnison, 2004	43
Figure 6 : Répartition du coût du cycle de vie pour l'industrie des hélicoptères, selon Glade et al. (2005).	44
Figure 7 : Répartition du coût du cycle de vie dans l'industrie automobile (Fédération française automobile club, 2002).	44
Figure 8 : Répartition du coût du cycle de vie dans l'industrie nucléaire, selon Bataille & Gailley (2000).	44
Figure 9 : Outillage appelé barre de tractage motorisée afin d'aider l'opérateur de maintenance à déplacer plus facilement l'hélicoptère au sol.	47
Figure 10 : Représentation des trois voies principales pour intégrer le facteur humain dans le processus de conception en maintenabilité. Figure construite sur la base de notre état de la littérature sur le sujet, en particulier les travaux de Lee et al.(2008) et Wann (2014).	50
Figure 11 : Processus et étapes de conception associées en maintenabilité, provenant du département maintenabilité de l'entreprise d'accueil et confirmant les travaux de la littérature (Clarkson et Eckert, 2010). Il convient de noter que ce processus est générique et non confidentiel.	67
Figure 12 : Parties techniques de l'hélicoptère H135 de Airbus Helicopters sur lesquelles huit zones ont été observées et étudiées. Nos documents techniques faisant ressortir toutes les caractéristiques des analyses de maintenabilité.	69

Tables des illustrations

Figure 13 : Répartition et comparaison de l'usage des outils de simulation en % : modeleur, mannequin numérique, maquette physique et réalité virtuelle (NS). Anova à 1 facteur ne fait pas ressortir de différence significative dans les outils utilisés (F= 4.4, N=15, et p=NS).	71
Figure 14 : Moyenne de pourcentage entre les critères ergonomiques étudiés et les outils associés (*p < 0.05; ** p < 0.01).	74
Figure 15 : Pourcentage des outils ergonomiques dans la catégorie de l'activité physique montrant la disparité des usages. Les grilles d'analyses personnalisées sont les plus utilisées tandis que les outils nécessitant une formation dédiée en facteur humain, tels que le goniomètre et l'électromyogramme, ne sont pas utilisés.	75
Figure 16 : Pourcentage de prise en compte de chacun des quatre indicateurs à travers l'ensemble des 16 documents techniques étudiés. Une Anova à 1 facteur fait ressortir une différence significative entre les indicateurs (F= 14,7, N=16, et p≤.001).....	76
Figure 17 : Pourcentage d'intégration du facteur humain, toutes approches confondues (étude ergonomique, collaboration et étude ergonomique & collaboration), pendant chacune des étapes du processus de conception de maintenabilité défini au sein de notre entreprise pilote. Le test de Cochran (Q) montre des différences significatives entre chaque étape (p≤.05).....	79
Figure 18 : Représentation des trois voies principales pour intégrer l'ergonomie dans le processus de conception en maintenabilité.....	87
Figure 19 : La démarche de conduite de projet en ergonomie selon Van Belleghem & Guerry (2016, adapté de Van Belleghem, 2012 et Barcellini, Van Belleghem & Daniellou, 2013).....	96
Figure 20 : Dimensionnement d'une trappe d'accès pour la main selon la norme NF EN ISO 14738 Novembre 2008 (X35-104 Sécurité des machines - Prescriptions anthropométriques relatives à la conception des postes de travail sur les machines).	97
Figure 21 : Ingénieur immergé dans un environnement 3D afin d'étudier l'accessibilité des pièces d'un moteur d'avion afin d'assurer la maintenance future.....	98
Figure 22 : Représentation du mannequin Anybody lors d'un exercice physique, associé au comportement du genou qui intègre un dispositif médical (Kang et al., 2018).....	99
Figure 23 : Premier simulateur de vol, nommé "Link Flight Trainer" (New Zealand Museum of War in Christchurch, New Zealand) conçu à des fins de formations des futurs pilotes pendant la seconde guerre mondiale.....	102
Figure 24 : Simulateur statique intégrant les premiers effets d'immersion visuelle et sonore, construit par Curtiss-Wright Corporation.....	103
Figure 25 : Système de bras haptiques synchronisés (gauche) et système de gants haptiques simulant l'action de préhension d'objets (droite).	104

Figure 26 : Pièce de moteur de voiture en impression 3D dédiée à une plateforme de réalité virtuelle par le constructeur automobile Ford sur le site Dearborn (2016).....	105
Figure 27 : Table modulaire utilisée sur une plateforme de réalité virtuelle et synchronisée avec le monde virtuel par le constructeur automobile Ford sur le site Dearborn (2016).....	106
Figure 28 : Maquette numérique (a) et maquette physique modulaire (b) permettant de changer rapidement les dimensions principales du véhicule (Roger et al., 2018) pour assurer des processus de conception plus court permettant de mieux prendre en compte le facteur humain.	107
Figure 29 : H225 de l'Armée de terre Française.	111
Figure 30 : Schématisation du plancher mécanique et de la passerelle (vue de dessus).....	112
Figure 31 : Eléments physiques intégrés à la plateforme de réalité virtuelle.	114
Figure 32 : Ensemble des outillages de maintenance mis à disposition des opérateurs pour réaliser chacune des 11 tâches de maintenance.....	115
Figure 33 : Plan de référence en anatomie exploité dans le cadre de l'analyse de l'activité de maintenance.	115
Figure 34 : Exemple des mesures anthropométriques : (1) hauteur trochantérienne, (2) largeur aux épaules, (3) largeur du bassin (assis).	116
Figure 35: Le mannequin numérique "Human Builder" avec l'option "enveloppe d'atteinte". L'option est ici déclenchée sur la main gauche. Nous pouvons observer trois enveloppes d'atteinte : vert (atteinte la moins contraignante pour les articulations) ; rouge (atteinte comprenant l'élévation du bras au-dessus de la tête) ; bleu (atteinte comprenant les mouvements dorso-lombaires).	118
Figure 36 : Durées d'exécution observées (en secondes) de onze tâches de maintenance sur maquette physique, et réalité virtuelle. Durée théorique d'exécution (en secondes) estimée par la méthode de mesure du temps moyen (MTM) fournie pour chaque tâche (Friedman, *: $p \leq 0,05$; **: $p \leq 0,01$; ***: $p \leq 0,001$).	121
Figure 37 : Opérateur effectuant la même tâche (2) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La même posture est observée.	123
Figure 38 : Opérateur effectuant la même tâche (6) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La posture est différente pour le mannequin numérique.	124
Figure 39 : Usage d'une clé dynamométrique réelle sur la plateforme de réalité virtuelle.....	126
Figure 40 : Opérateur effectuant la même tâche (2) de maintenance entre le mannequin numérique, la plateforme de réalité virtuelle et la maquette physique. La même posture est observée.	128

Figure 41 : Définition de l'acceptabilité retenue dans la thèse de Barcenilla & Bastien (2009).	142
Figure 42 : Modèle conceptuel de la démarche d'analyse ergonomique PEAM.....	145
Figure 43 : Processus détaillant la première grande étape de la démarche PEAM: passer du processus existant en maintenabilité vers la démarche PEAM.	150
Figure 44 : Découpage extérieur retenu d'un hélicoptère, en zones principales où la maintenance est effectuée.....	152
Figure 45 : Découpage intérieur d'un hélicoptère, divisé en zones principales où la maintenance est effectuée.....	152
Figure 46 : Méthodologie de conception centrée sur l'Homme, extrait du modèle proposé par Chitescu et al., 2003, sur la base de ses travaux conduits au sein de notre équipe de recherche (ERCOS du Laboratoire ELLIADD).	153
Figure 47 : Zonage du processus de conception réalisé dans le cadre du développement de l'outil PEAM établi avec le groupe projet en fonction du niveau de maturité des maquettes numériques et physiques.	154
Figure 48 : Maintenance effectuée dans la poutre de queue d'un hélicoptère.....	156
Figure 49 : Processus détaillant la deuxième étape de la démarche PEAM: le choix de l'outil de simulation.	160
Figure 50 : Méthodologie pour choisir les mannequins et les opérateurs réels par rapport à l'anthropométrie.....	163
Figure 51 : Silhouette permettant de sélectionner les zones douloureuses pendant l'activité (extrait du questionnaire Nordique).....	167
Figure 52 : Représentation de la perceptibilité visuelle des détails de l'environnement de travail sous l'outil EMMA.	170
Figure 53 : Représentation de la possibilité de reposer son bras sur un support pendant l'activité de travail.	171
Figure 54 : Processus détaillant le protocole pour préparer les outils de simulation et l'étape pour réaliser l'analyse ergonomique, selon la démarche PEAM.....	173
Figure 55 : Outil Excel permettant d'automatiser l'analyse en facteur humain de la démarche PEAM.	175
Figure 56 : Processus générale de la démarche PEAM.	180

Figure 57 : Zonage du processus de conception réalisée dans le cadre du développement de l’outil PEAM, rappel du chapitre 3. 193

Figure 58 : Sans le déploiement de la démarche PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (\pm ET) du nombre de fois où les outils de simulation ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus. Il existe un effet phase entre la phase 2 et les phases 1,3,4,5 pour lesquelles, il n’y pas de différence significative entre elles, concernant l’usage des outils de simulation. (***) : $p \leq 0.001$). 197

Figure 59 : Avec le déploiement de la démarche PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (\pm ET) du nombre de fois où les outils de simulation ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus. Il n’y pas de différence significative entre les phases (NS). 198

Figure 60 : SANS l’usage de l’outil PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (\pm ET) du nombre de fois où les indicateurs ergonomiques ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus (** : $p \leq 0.01$). 199

Figure 61 : Avec l’usage de l’outil PEAM, répartition des phases en fonction de la moyenne (\pm ET) du nombre de fois où les indicateurs ergonomiques ont été utilisés, tous acteurs-métiers confondus (***) : $p \leq 0.001$). 200

Figure 62 : Pourcentage des analyses de maintenabilité intégrant une approche du facteur humain réalisées dans chacune des phases du processus de conception, test de Mann-Whitney pour comparer SANS et AVEC le déploiement de la démarche PEAM (N=8, * $p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.005$). 202

Figure 63 : Notes moyennes (\pm ET) pour chacune des trois questions posées sur l’efficacité, la clarté et la pertinence de la démarche PEAM, tous outils de simulation et acteurs-métiers confondus. Le test statistique conduit (test de Friedman) ne traduit aucune différence significative. 203

Figure 64 : Notes moyennes du questionnaire (\pm ET) sur la clarté de la démarche PEAM en fonction des phases du processus de maintenabilité, tous acteurs-métiers confondus (** $p \leq 0.005$). 1 étant défini comme peu clair et peu intuitif, 5 étant très clair et très intuitif. 204

Figure 65 : Notes moyennes du questionnaire (\pm ET) sur la pertinence de la démarche PEAM en fonction des phases du processus de maintenabilité, tous acteurs-métiers confondus (* $p \leq 0.05$). 1 étant un impact nul, sans prise en compte des exigences ergonomiques, 5 étant une acceptation totale des recommandations. 204

Figure 66 : Opérateur effectuant la même tâche de maintenance entre le mannequin numérique (A), la plateforme de réalité virtuelle (B) et la maquette physique (C). La même posture est observée dans ce cas. 224

Figure 67 : Modèle conceptuel de la démarche d’analyses ergonomiques PEAM. 230

Figure 68 : Représentation des trois voies principales pour intégrer l’ergonomie dans le processus de conception en maintenabilité. 239

Tables des illustrations

Figure 69: Exemple d'un contrôle qualité de moteur de voiture réalisé à l'aide d'un casque de réalité augmentée.	241
Figure 70 : "Spectre de la réalité mixte", synergie entre réalité virtuelle et augmentée (trout et al., 2018).	242
Figure 71 : Schématisation couplant la recherche actuelle (vert) et les axes futurs d'amélioration (orange) en tenant compte notamment des erreurs humaines en maintenance.....	243

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Ensemble des indicateurs de maintenance pour la maintenabilité.....	53
Tableau 2 : Indicateurs de maintenance prenant en compte le facteur humain en maintenabilité....	55
Tableau 3 : Notation de deux indicateurs de maintenance, l'accessibilité et l'assemblage/désassemblage selon l'approche de Moreu De Leon et al., 2012. Cette étude permet de noter, sur cette même approche, 7 autres indicateurs de maintenance couramment utilisés : l'organisation du personnel, l'environnement, la disponibilité des pièces de rechange, les caractéristiques des outillages de maintenance (masse, volume), le niveau de collaboration entre les différents départements du bureau d'études et la disponibilité d'une documentation pour aider l'opérateur dans sa tâche.	57
Tableau 4 : Caractéristiques des acteurs-métiers du département maintenabilité qui ont été amenés à répondre à notre questionnaire semi-directif, les personnes sont classées par ordre croissant en fonction de leur âge.	62
Tableau 5 : Parties composant notre questionnaire semi-directif soumis aux personnels du département de maintenabilité.....	63
Tableau 6 : Catégories de critères ergonomiques et critères associés les plus couramment utilisés au cours des analyses ergonomiques. Ils sont retenus pour le questionnaire semi-directif et diffusés au sein du département maintenabilité.	64
Tableau 7 : Catégories d'outils ergonomiques et outils associés les plus couramment utilisés au cours des analyses ergonomiques. Ils sont retenus pour le questionnaire semi-directif et diffusés au sein du département maintenabilité.....	65
Tableau 8 : Moyenne de pourcentage des critères ergonomiques et des outils associés, le test de Mann-Whitney utilisé montre une différence significative entre critères et outils ($F=4.49$, $N=15$, $***p \leq .001$).	72
Tableau 9 : Détails des données permettant de réaliser le test t-student. N correspondant au nombre d'acteurs-métiers utilisant les critères et outils associés pour chacune des catégories.	73
Tableau 10 : Outils de simulation (modeleur, Mannequin Numérique (MN), Réalité Virtuelle (RV), Maquette physique (MP) et Hélicoptère réel (Héli)) et indicateurs pris en compte et étudiés chez un hélicoptériste.	76

Tableau 11 : Distribution de la réalisation d'étude ergonomique, de collaboration, d'étude ergonomique et de collaboration au cours de chacune des étapes du processus de conception de maintenabilité défini au sein de notre entreprise pilote. Le test de Fisher a été utilisé pour étudier les

Tables des illustrations

relations entre les distributions, et l'étape de revue de pré-développement ressort seule avec une relation significative entre l'étude ergonomique et la collaboration (N=15 ; ** $p \leq .01$).	78
Tableau 12 : Synthèse des résultats de l'observation industrielle.	85
Tableau 13 : Exemple de mannequins développés pour analyser des situations de travail dans divers domaines, signalé par le sigle « X », tels que l'aviation, l'automobile et autre, incluant le médical, les postes de travail... ..	99
Tableau 14 : Description de chacune des 11 tâches.	113
Tableau 15 : Caractéristiques de chaque opérateur et mesures anthropométriques appliquées pour créer les mannequins numériques.	117
Tableau 16 : Indicateurs ergonomiques et outils associés, dans l'étude et la conception de tâches de maintenance avec l'usage des mannequins numériques (MN), de la réalité virtuelle (RV) et de la maquette physique (MP).	120
Tableau 17 : Douleurs musculo-squelettiques ressenties, effort physique perçu (échelle de Borg) et charge mentale de travail (NASA-TLX) pour chaque tâche de maintenance retenue effectuée sur la plateforme de réalité virtuelle et sur la maquette physique ($p \leq 0.05$).	122
Tableau 18 : Comparaison des trois outils de simulation basée sur les scores RULA et les indicateurs de sécurité au travail pour chaque tâche (Test de Friedman: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$). ...	124
Tableau 19 : Synthèse de la discussion.	131
Tableau 20 : Notation utilisée en industrie aéronautique pour évaluer le facteur humain en maintenabilité pour effectuer une tâche de maintenance.	143
Tableau 21 : Indicateurs principaux et leurs définitions associées pour réaliser une analyse préliminaire d'accessibilité. Ces indicateurs sont les plus utilisés dans la littérature scientifique de la maintenabilité pour étudier des tâches de maintenance.	147
Tableau 22 : Indicateurs principaux et systèmes de notation pour réaliser une analyse préliminaire d'accessibilité. Si un des indicateurs à un score supérieur ou égal à 3, PEAM doit être utilisée.	148
Tableau 23 : Nom de chaque zone de l'hélicoptère par laquelle la maintenance peut s'effectuer par l'extérieur et l'intérieur.....	152
Tableau 24 : Outils de simulation choisis en fonction de la zone d'accès extérieur et de l'étape du processus de conception. (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).	155

Tables des illustrations

Tableau 25 : Outils de simulation choisis en fonction de la zone d'accès intérieur et de l'étape du processus de conception (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).	156
Tableau 26 : Indicateurs ergonomiques retenus dans la démarche PEAM.	158
Tableau 27 : Indicateurs ergonomiques en fonction de l'outil de simulation et des zones de travail sur l'hélicoptère. (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).	159
Tableau 28 : Prérequis pour préparer chaque outil de simulation à une analyse de facteur humain (M : maquette numérique ; MN : mannequin numérique ; RV : réalité virtuelle ; MP : maquette physique).	164
Tableau 29 : Notation des indicateurs de sécurité au travail en termes d'occurrence, d'impact sur l'environnement, d'impact sur l'opérateur.	169
Tableau 30 : Matrice générale faisant le lien entre le score général de risques et le score général de l'analyse EMMA.	172
Tableau 31 : Caractéristiques de chaque acteur-métier du département maintenabilité.	192
Tableau 32 : Enumération des tâches de maintenance sur les parties techniques, réalisées sans et avec la démarche PEAM pendant la période de l'expérimentation, d'avril 2017 à septembre 2018 (accessibilité extérieure et intérieure correspond à la maintenance réalisée depuis l'extérieur ou depuis l'intérieur de l'hélicoptère).	194
Tableau 33 : Ecart de l'utilisation entre chaque outil de simulation (aucun outil, modéleur, mannequin numérique, réalité virtuelle et maquette physique), SANS et AVEC la démarche PEAM, dans chacune des phases du processus. Le test de Fisher a été utilisé pour mesurer l'écart avec et sans PEAM (N=8 ; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$).	199
Tableau 34 : Analyse des écarts des pourcentages d'utilisation des indicateurs ergonomiques au cours de chacune des phases du processus, avec le déploiement ou non de la démarche PEAM. Le test de Fisher a été utilisé pour observer la relation existante avec et sans PEAM (N=8 ; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$).	201
Tableau 35: Synthèse de la discussion.	212

LISTE DES PUBLICATIONS

ACL - Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'HCERES ou dans les bases de données internationales (ISI Web of Knowledge, Pub Med, Scopus...).

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C., Paquin, R. Using Digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability. Human factors. 2019. <http://doi.org/10.1177/0018720819861496>.

Bernard, F., Zare M., Sagot, J-C., Paquin, R. Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability. Hum. Factors Man. 2019; 29:350-360. <https://doi.org/10.1002/hfm.20792>

Vignais, N., Bernard, F., Touvenot, G., Sagot, J-C (2017). "Physical risk factors identification based on body sensor network combined to videotaping". Applied Ergonomics, May, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.003>

ACTI -communications avec actes dans un congrès international

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2018, August). Virtual Reality Simulation and Ergonomics Assessment in Aviation Maintainability. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 141-154). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15

Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017, January). "Consideration of Human Factors in aeronautical maintainability". Annual Reliability and Maintainability Symposium. (IEEE.), p37-43 <https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889653>

ACTN - communications avec actes dans un congrès national avec comité de lecture

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J.C., Paquin, R. (2018). Les outils de simulation numérique pour une meilleure prise en compte du facteur humain en maintenabilité. 25ème Colloque International des Sciences de la Conception et de l'Innovation, Budapest, Hongrie

Bernard, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017). Simulation de l'activité de maintenance pour une meilleure intégration du facteur humain en maintenabilité. 24ème Colloque International des Sciences de la Conception et de l'Innovation, Séville, Espagne.

Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2016). Prise en compte du facteur humain en maintenabilité : cas d'un hélicoptériste. 23ème Colloque International des Sciences de la Conception et de l'Innovation, Prague, République Tchèque.

Liste des publications

Bernard, F., Mahdjoub, M., Varret, A., Bazzaro, F., Sagot, J.C. (2015). Conception pour la maintenabilité : Etat de l'art des efforts d'intégration de l'ergonomie pour la maintenance aéronautique. 22ème Colloque International des Sciences de la Conception et de l'Innovation, Lisbonne, Portugal.

Poster:

Bernard, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017). Integration of ergonomics within preliminary process design dedicated to maintainability: contribution of numerical tools. PhD event Airbus Group, Airbus Filton, UK.

Prix scientifiques :

2016, Best Paper Award, CONFERE 2016, Prague.

2017, PhD Day, Best « my thesis in 3 minutes » speaker, Airbus Bristol.

2019, "Human error in maintenance" Project team / Quality award, Airbus Helicopters.

2019, "Human factors integration in maintenance", Project team, HeliOffshore.

ANNEXE

Annexe 1 : Questionnaire soumis aux acteurs-métiers du département maintenabilité de l'entreprise pilote

Questionnaire semi-directif

Phase 1

Ce questionnaire vise à connaître vos connaissances en ergonomie de manière générale et comment vous les utilisez en maintenabilité en particulier.

Les données seront traitées et analysées de façon anonyme.

Utilisation : la partie 1 de ce questionnaire est automatique, il vous suffit de cliquer/cocher les réponses et de répondre librement aux emplacements en pointillé. La partie 2 se fera directement sur le graphique à l'aide de stylos de couleur noir, rouge et vert.

Partie 1 : Questions préliminaires :

1. Age :
2. Quelle est votre formation initiale ?

Technicien supérieur Ingénieur

Autre (précisez) :

.....

3. Quel est votre métier, voire vos responsabilités dans l'entreprise :

.....

.....

4. Répartissez approximativement le pourcentage de temps passé, depuis votre arrivée au service maintenabilité, sur chaque gamme d'hélicoptère suivante (le total doit être égal à 100%)

.....% Léger (ex : AS350) Moyen (ex : dauphin, H160) %Lourd (ex : Super Puma)

5. Sur l'ensemble des projets, donnez en pourcentage votre implication sur des programmes militaires :%

6. Donnez votre propre définition de l'ergonomie

.....
.....

7. Avez-vous déjà eu une formation en ergonomie ?

Oui Non

8. Si oui, quelle-était-elle ?

.....
.....

9. Quelles compétences en ergonomie avez-vous acquis au cours de votre carrière ?

Ergonomie physique (Anthropométrie, biomécanique, efforts, bruit, chaleur, lumière, vibrations,...)

Ergonomie cognitive (Perception, mémoire, raisonnement, traitement de l'information, charge mentale,...)

Ergonomie organisationnelle (la gestion des ressources des collectifs, la conception du travail, le travail en équipe,...)

Autre?

.....
.....
.....

10. Dans le tableau ci-dessous, nous souhaitons identifier les différents critères/indicateurs que vous observez au cours des études de maintenabilité

10.1 Cochez, **dans la colonne de gauche**, le ou les catégories de critères que vous utilisez.

10.2 Pour chaque catégorie de critères sélectionnés, cochez, **dans la colonne de droite**, les critères que vous observez, analysez, évaluez au cours des études de maintenabilité.

Catégories de critères	Critères
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec les ambiances physiques environnementales	<input type="checkbox"/> Ambiance atmosphérique
	<input type="checkbox"/> Ambiance lumineuse
	<input type="checkbox"/> Ambiance sonore
	<input type="checkbox"/> Ambiance thermique
	<input type="checkbox"/> Ambiance vibratoire
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec l'activité physique des opérateurs	<input type="checkbox"/> Amplitude des mouvements
	<input type="checkbox"/> Efforts
	<input type="checkbox"/> Postures
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec l'organisation de l'activité de travail	<input type="checkbox"/> Implantation de travail
	<input type="checkbox"/> Autonomie de l'opérateur
	<input type="checkbox"/> Sécurité espace de travail
	<input type="checkbox"/> Entraînement
	<input type="checkbox"/> Monotonie
	<input type="checkbox"/> Répétitivité
	<input type="checkbox"/> Temps de l'activité
<input type="checkbox"/> Temps de l'effort	
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec l'activité sensorielle et cognitive des opérateurs	<input type="checkbox"/> Exigence mentale de la tâche
	<input type="checkbox"/> Erreur humaine
	<input type="checkbox"/> Intérêt du poste (latitude décisionnelle)
	<input type="checkbox"/> Champ de vision
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec la santé au travail	<input type="checkbox"/> Traitements des signaux et informations
	<input type="checkbox"/> Accident et incidents du travail
<input type="checkbox"/> Critères en lien avec les caractéristiques des opérateurs	<input type="checkbox"/> Doléances des opérateurs
	<input type="checkbox"/> Anthropométrie (taille)
	<input type="checkbox"/> Expertise (expériences et connaissances)

11. Dans le tableau ci-dessous, nous souhaitons identifier les différents outils que vous utilisez au cours des études de maintenabilité :

11.1 Cochez, **dans la colonne de gauche**, le ou les catégories d'outils que vous utilisez.

11.2 Pour chaque catégorie d'outils utilisés, cochez, **dans la colonne de droite**, les outils que vous utilisez.

Catégories d'outils	Outils
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure des ambiances environnementales	<input type="checkbox"/> Accéléromètre (capteur sol, machine etc)
	<input type="checkbox"/> Luxmètre
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille standardisée
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Observation vidéo/photo avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Sonomètre
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure de l'activité physique des opérateurs	<input type="checkbox"/> Thermomètre, hygromètre...
	<input type="checkbox"/> Accéléromètre (capteur à l'intersection corps-machine,...)
	<input type="checkbox"/> Analyse vidéo séquencée
	<input type="checkbox"/> Dynamomètre
	<input type="checkbox"/> Electromyogramme (EMG)
	<input type="checkbox"/> Electrocardiogramme (ECG)
	<input type="checkbox"/> Equation révisée du NIOSH (lever de charge)
	<input type="checkbox"/> Goniomètre/Electro-goniomètre (mesure sur l'opérateur)
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille standardisée
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Observation vidéo/photo avec grille personnelle
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure pour évaluer l'ergonomie organisationnelle	<input type="checkbox"/> Système de capture de mouvement
	<input type="checkbox"/> Analyse vidéo séquencée
	<input type="checkbox"/> Etude de temps pour réaliser une activité
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille standardisée
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure cognitifs et psychosociaux	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Observation vidéo/photo avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Analyse vidéo séquencée
	<input type="checkbox"/> Etude de temps pour réaliser une activité
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille standardisée
	<input type="checkbox"/> Observation directe/visuelle avec grille personnelle
	<input type="checkbox"/> Mesures psycho-physiologiques (données biologiques, électro-physiologiques,...)
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure pour évaluer la santé au travail	<input type="checkbox"/> Questionnaire sur les risques psychosociaux
	<input type="checkbox"/> Questionnaire sur la charge mentale
<input type="checkbox"/> Moyens de mesure des caractéristiques des opérateurs	<input type="checkbox"/> Document unique
	<input type="checkbox"/> Recueil des accidents au travail (médecine du travail)
	<input type="checkbox"/> Outils statistiques
	<input type="checkbox"/> Questionnaire pour évaluer le niveau de connaissance
	<input type="checkbox"/> Trousse anthropométrique

Autre ? (Ajoutez d'autres outils que vous utilisez)

.....

12 Si vous utilisez certains outils dans la liste suivante pour réaliser des analyses ergonomiques, classez-les du plus utilisés au moins utilisés :

Ordre	Outils
	DMU (Digital Mock up)
	DHM (Digital Human Modeling)
	Maquette physique – échelle réduite
	Maquette physique – échelle 1
	Produit fini – échelle 1
	Réalité Augmentée
	Réalité Virtuelle

Autre?

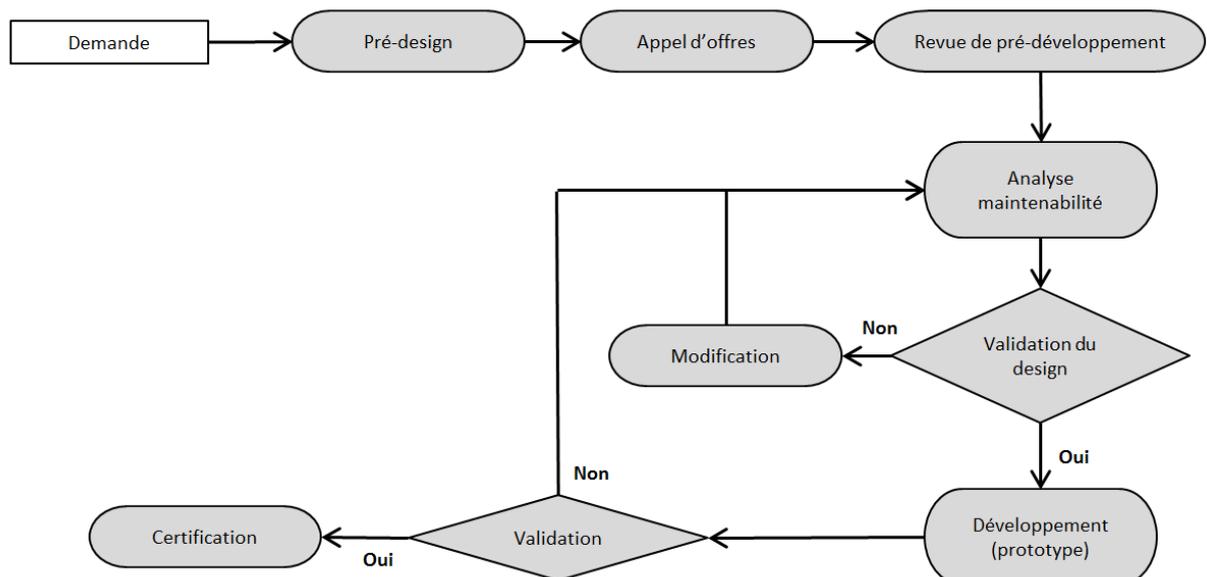
Partie 2) Approche méthodologique du processus de conception sur service maintenabilité :

Le schéma qui vous est maintenant présenté détaille le processus du département maintenabilité, depuis la réception d’une demande client jusqu’à la certification de la solution. Ce schéma, en cours de construction, vous semble-t-il cohérent ?

Si vous avez des remarques, vous pouvez écrire sur le schéma en **noir** ou **bleu**.

13 Dans ce schéma, indiquez en **rouge** les zones où vous impliquez l’aspect ergonomique.

14 Dans ce schéma, indiquez en **vert** les zones où vous collaborez avec d’autres départements pour décider des choix ergonomiques (qui peuvent impacter les caractéristiques techniques et économiques).



Annexe 2 : Questionnaire préliminaire aux observations de terrain

La simulation concerne aujourd’hui la maquette physique, sur laquelle vous allez réaliser des tâches de maintenance. L’analyse ergonomique de votre travail permettra de comprendre et de hiérarchiser vos difficultés pour réaliser ces tâches. Nous tenterons ainsi d’améliorer l’architecture du produit, de développer des outillages pour faciliter la maintenance et développer des cartes de travail en accord avec votre travail.

Ce premier questionnaire vise à recueillir des informations générales qui serviront directement à notre analyse ergonomique et au recoupement des données ergonomiques.

Les données seront traitées et analysées de façon anonyme. Les prises de vue seront strictement utilisées dans le cadre de ce travail et ne seront en aucun cas diffusées.

INSTRUCTIONS GÉNÉRALES

Dans les pages qui suivent, répondez soit en écrivant sur les pointillés, soit en cochant la case appropriée (une seule réponse par question). En cas d’hésitation, choisissez la réponse qui se rapproche le plus de votre cas.

Nous vous expliquerons le déroulement de l’expérimentation après ce premier questionnaire.

1. En quelle année êtes-vous né ?

.....
.....

2. Quelle est votre formation initiale ?

.....
.....

3. Quel emploi occupez-vous actuellement dans l’entreprise ? :

.....
.....

4. Dans quel département travaillez-vous ?

.....
.....

5. Depuis combien d'années et de mois faites-vous le travail que vous effectuez actuellement ?

.....
.....

6. Depuis combien d'années et de mois travaillez-vous dans cette entreprise ?

.....
.....

7. Votre emploi est-il permanent ou occasionnel ?

Permanent Occasionnel

8. Travaillez-vous à temps complet ou à temps partiel ?

Complet Partiel

9. Quel est votre poids ?

..... Kg

10. Etes-vous droitier ou gaucher ?

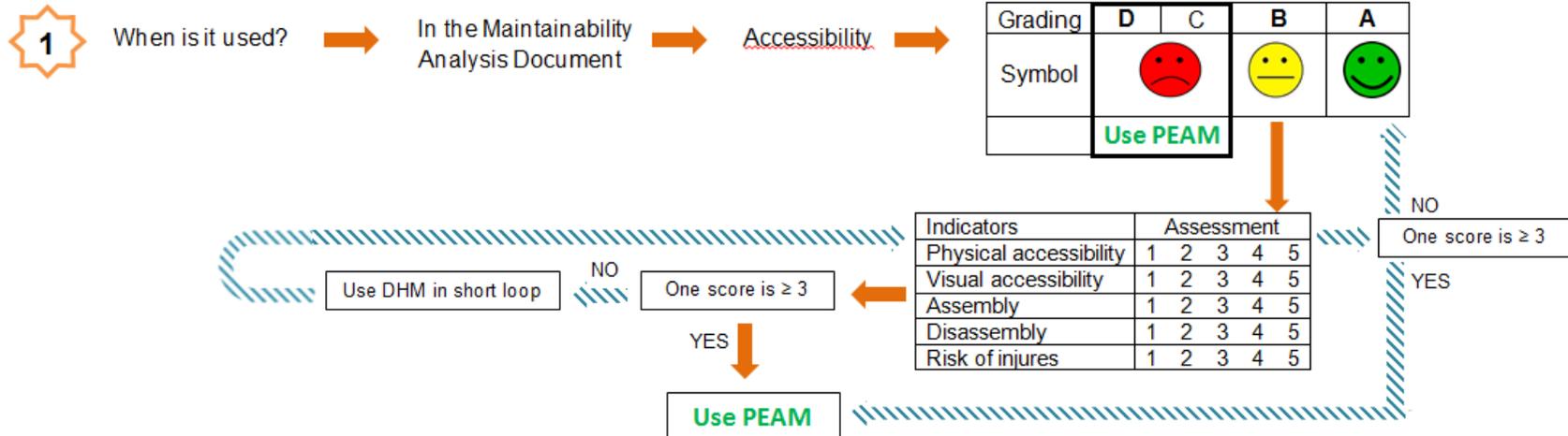
Droitier Gaucher Les deux

11. Une série de mesures anthropométriques va maintenant être réalisée. En d'autres termes, nous allons maintenant réaliser quelques mesures comme votre taille, la largeur de vos hanches et vos épaules ou encore les dimensions de votre main.

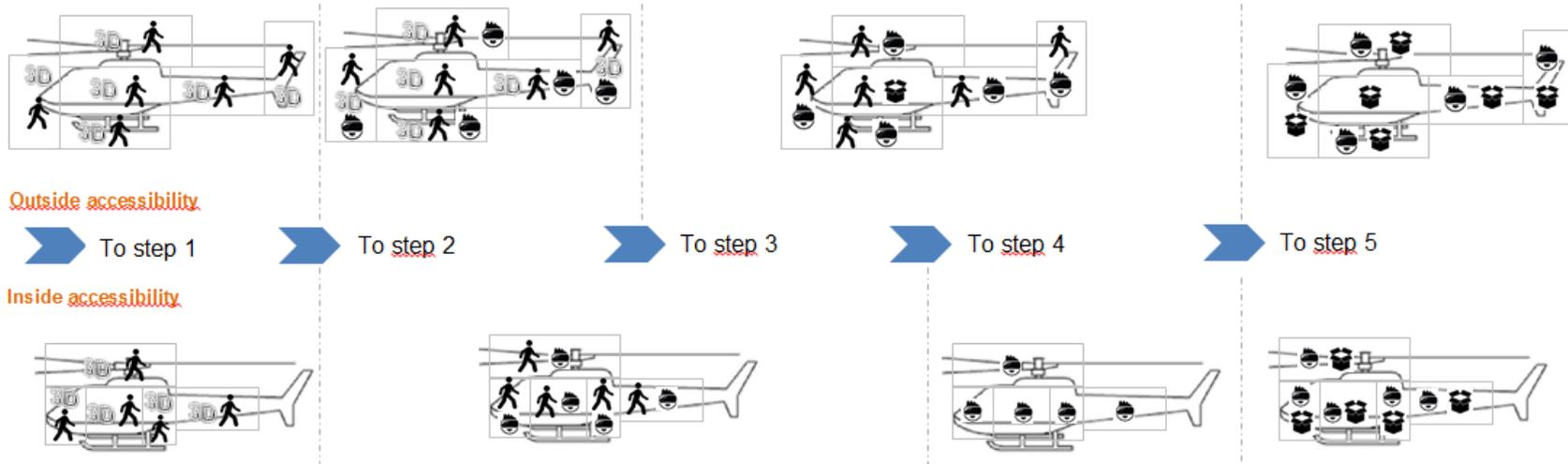
12. Les tâches de maintenance vont maintenant vous être expliquées oralement. Pour chacune d'elle vous devrez les réaliser naturellement, comme si vous étiez en activité dans votre atelier. Aucune question ne vous sera posée pendant la réalisation des tâches. Au cours de votre activité, n'hésitez pas à faire des remarques sur ce que vous êtes en train de faire en termes de ressenti physique, d'organisation, de contrainte avec l'environnement etc. N'hésitez pas à exprimer vos difficultés, vos gênes, les points positifs que vous remarquez...

Annexe 3 : Fiche pratique résumant la démarche PEAM

Preliminary Ergonomics Assessment in Maintainability (PEAM)



2 DMU DHM VR PMU



3 Select a simulation tool by detail ergonomic indicators

DMU Physics 	DHM Physics 	VR Physics, cognitive & organizational 	PMU Physics, cognitive & organizational 
<ul style="list-style-type: none"> Volume constraints: MIL STD 1472 	<ul style="list-style-type: none"> Posture Force Visual field Collision Safety at work 	<ul style="list-style-type: none"> Posture Force Safety at work Visual field Mental work load 	<ul style="list-style-type: none"> Posture Force Safety at work Visual field Mental work load Time

4 Choice of Ergonomics assessment tools

	DMU 	DHM 	VR (with operators) 	PMU (with operators) 
Prerequisites	X	<ul style="list-style-type: none"> Insert three male manikins, European, at 5^m, 50^m and 95th 	<ul style="list-style-type: none"> Choose 3 operators with following characteristics: <ol style="list-style-type: none"> Same sex, representing the panel of population studied Three different sizes (1m65, 1m75, 1m85) Similar BMI (Body Mass Index) Similar level (qualification and experience) Train operators of they do not know the system Observe and record with camera (photos & videos) - take the sagittal plan of the operator Make screen shot of the screen 	<ul style="list-style-type: none"> Choose 3 operators with for characteristics: <ol style="list-style-type: none"> Same sex, representing the panel of population studied Three different sizes (1m65, 1m75, 1m85) Similar (BMI, Body Mass Index) Similar level (qualification and experience) Observe and record with camera (photos & videos) - take the sagittal plan of the operator

5 Assess your work situation

USED EXCEL FILE and observe the score

Risks (N) \ EMMA	0	1	2	3
0	A	A	B	C
1	A	A	B	C
2	B	B	B	C
3	C	C	D	D
4+	D	D	D	D

- If score = B, C or D: change design, design maintenance tool or imagine new process to perform the task.
- Perform again PEAM with your new solution.
- In case of doubt, please contact human factor expert.

Titre : Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation

Mots clés : facteur humain, ergonomie, simulation numérique, maintenabilité, aéronautique

Résumé : La maintenabilité, entité du bureau d'études visant à concevoir la maintenance future d'un produit, s'intéresse de plus en plus à la discipline du facteur humain. Pour se faire, dans un contexte pluridisciplinaire très orienté ingénierie et conception, l'acteur-métier spécialisé en maintenance essaie de comprendre et d'anticiper l'activité future de l'opérateur de maintenance à travers ses propres connaissances. C'est dans ce contexte que se situe notre problématique « Comment mieux prendre en compte le facteur humain dans les phases de développement et de conception en maintenabilité, là où les acteurs-métiers ne sont ni formés, ni initiés au facteur humain, et en particulier à l'ergonomie »

Nos travaux ont été conduits au sein d'un constructeur d'hélicoptère français. Quatre contributions majeures en ressortent: (1) étudier et comprendre comment le facteur humain est aujourd'hui intégré en maintenabilité aéronautique; (2) comprendre les limites et les avantages des outils de simulation (mannequin numérique, réalité virtuelle, maquette physique), à des fins d'analyses ergonomiques ; (3) développer une démarche favorisant l'intégration du facteur humain en maintenabilité par des non experts en ergonomie ; (4) valider la démarche au sein même du service maintenabilité. Ces contributions nous ont permis de répondre à notre problématique de recherche et ainsi de contribuer à l'amélioration de la prise en compte du facteur humain en maintenabilité aéronautique.

Title : Human factors integration in aviation maintainability : contribution of simulation tools

Keywords : human factors, ergonomics, digital simulation, maintainability, aviation

Abstract: Maintainability, the entity of the design office anticipates the future maintenance of a product, is interested more and more in Human Factors. To do this, in a multi-disciplinary context with a strong engineering and design focus, the maintenance stakeholders try to understand the future activity of the maintenance operators and anticipate the potential risk exposures only through their specific knowledge. Our research question was formulated in this context as "how to better integrate human factor in the development and design process of maintainability, where the stakeholders are neither trained nor familiarized with the human factor and ergonomics."

Four significant axes of this study that was conducted in a French helicopter company are: (1) studying how human factor is already integrated into aviation maintainability; (2) understanding the limitations and strengths of simulation tools (digital human modeling, virtual reality, physical model) widely used for ergonomics purposes; (3) proposing an innovative approach (consists of a methodology and a tool) to improve the integration of human factors into maintainability by non-experts in ergonomics; (4) testing this approach to determine its effectiveness on the design process in the maintainability department. These axes allowed us to answer our research questions and thus contribute to the improvement of the human factor integration in maintainability.