

L'Ergonomie et les Facteurs Humains en maintenabilité aéronautique : simulation et pédagogie pour une conception anthropocentrée

Fabien Bernard

▶ **To cite this version:**

Fabien Bernard. L'Ergonomie et les Facteurs Humains en maintenabilité aéronautique : simulation et pédagogie pour une conception anthropocentrée. Sciences de l'Homme et Société. Université de Picardie Jules Verne (Amiens), 2024. ⟨tel-04685741⟩

HAL Id: tel-04685741

https://hal.science/tel-04685741v1

Submitted on 3 Sep 2024

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

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



HAL Authorization

Habilitation à Diriger des Recherches
Psychologie – Ergonomie

L'Ergonomie et les Facteurs Humains en maintenabilité aéronautique : simulation et pédagogie pour une conception anthropocentrée.

Présentée par Fabien BERNARD

UFR Sciences Humaines Sociales et Philosophie
Centre de Recherche en Psychologie : Cognition, Psychisme et Organisations (UR 7273 CRP-CPO)
École Doctorale Sciences Humaines et Sociales (ED 586)
Université de Picardie Jules Verne

Le 12 juillet 2024

Composition du Jury

Pr. André Tricot, Université Paul Valéry Montpellier	Rapporteur
Pr. Nathalie Bonnardel, Aix-Marseille Université	Rapporteur
Pr. Simon Richir, Arts et Métiers Paris Tech	Examinateur
MCF, HDR, Philippe Cabon, Université Paris Descartes	Examinateur
Dr. Florence Reuzeau, Executive expert, Airbus	Invité
Pr. Emilie Loup-Escande, Université de Picardie Jules Verne	Garant

Remerciements

Ce manuscrit marque le point final d'un cycle universitaire long et sinueux, parfois complexe et obscur mais toujours passionnant. Et quelque part, j'ai vécu mes plus belles émotions professionnelles grâce à ce monde. Mais ce travail universitaire, conduit en parallèle de ma carrière industrielle, ne peut pas se faire seul. D'ailleurs, il n'aurait jamais vu le jour sans un collectif bienveillant et porteur d'idées. Les collaborations, les discussions et les conseils ont façonné les réflexions portées dans ce manuscrit. Je souhaite ainsi remercier l'ensemble des personnes et les instituions qui ont contribué à la genèse et à la réalisation de ce travail de recherche.

A Monsieur André Tricot, Professeur des Universités à l'Université Paul-Valéry Montpellier, membre de l'unité de recherche Laboratoire de psychologie, et à Madame Nathalie Bonnardel, Professeure des Universités à Aix-Marseille Université, Directrice de l'Institut Créativité et Innovations d'Aix-Marseille Université, pour avoir accepté de juger ce travail et de me faire l'honneur d'en être rapporteur.

A Monsieur Simon Richir, Professeur des Universités aux Arts et Métiers Paris Tech d'Angers, Directeur scientifique de Laval Virtual et Directeur délégué de l'Institut Laval Arts et Métiers, et à Monsieur Philipe Cabon, Maître de Conférences et Habilité à Diriger des Recherches à l'Université Paris Cité, membre du Laboratoire de Psychologie et d'Ergonomies Appliquées d'avoir accepté d'être examinateur de cette HDR.

A Madame Florence Reuzeau, Docteur en ergonomie et Executive Expert dans le domaine des Facteurs Humains à Airbus, d'avoir accepté de relire ce mémoire, de le critiquer et d'être présente pour la soutenance.

A Madame Emilie Loup-Escande, Professeure des Universités à l'Université de Picardie, directrice de l'unité de recherche « Centre de recherche en Psychologie – Cognition, Psychisme et Organisation », d'avoir accepté d'être garante de ce travail, de m'avoir accompagné alors que nous n'avons jamais travaillé ensemble auparavant. Merci pour ta disponibilité et ta grande réactivité qui m'ont permis de garder confiance et d'être toujours motivé durant les deux années de rédaction.

A l'ensemble de l'équipe de maintenabilité d'Airbus, qui, au travers de nos échanges, ont contribué à de nombreuses réflexions exposées dans ce rapport. Plus particulièrement, merci à Raphael Paquin, ami et collègue, ton soutien sans faille depuis 2014 dans ma volonté de maintenir un certain niveau de recherche en industrie a largement contribué à motiver ce travail. A Kévin-Dos Santos et Jean-Luc Avy, respectivement responsable de l'équipe maintenabilité et du service ETXO, pour leur soutien, leur compréhension et leurs conseils très précieux pour rester dans les « rails » du monde industriel.

A tous mes collègues chercheurs, ingénieurs, techniciens et de l'administration de l'équipe ERgonomie et COnception des Systèmes de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard pour leur soutien et leurs conseils depuis de nombreuses années.

Aux collègues de Polyaero, Xavier B., Françoise B., Killian M., Nicolas B., Essam Y., Martial P., Cédric B., Alexandra J. pour les bons moments passés ensemble et le travail accompli collectivement. Je n'oublie pas les collègues d'Aix-Marseille-Université, notamment de l'IUT GMP, Joseph M., Laurent C. et du

département Psychologie, Nathalie B. Pour toutes ces institutions, je tiens aussi à remercier le personnel administratif.

A tous mes collègues et amis ergonomes, Nicolas V., Morgane R., Laurence B., Camille M. Une mention spéciale à l'équipe du CNAM Paris qui se reconnaitra. Nos échanges dans le cadre de la thèse de Camille ont aussi contribué à murir certaines réflexions. A l'équipe de l'ENSAM de Laval, Simon R. et Sylvain F., avec qui nos nombreux échanges et travaux communs ont apporté de nouvelles dimensions dans ce manuscrit. A Nataly J., merci d'avoir accepté la corédaction d'un article, je sais le travail supplémentaire que tu as dû fournir dans un emploi du temps débordant, je t'en suis très reconnaissant.

A tous mes amis, qui se demandent pourquoi faire plus après la thèse mais qui ont compris, soutenu et donné l'énergie d'avancer : Marius B., Deborah M., Konstanca N., Kévin H., Pierre L., Marie-Hanna L., Jean-Marc B., Maxime L., Olivier A., Raphael G. Un clin d'œil tout particulier à Annie et Gérard qui, par leur amitié et leur aide ont facilité bien des choses.

A ma famille, à mes parents qui m'ont toujours soutenu. Je sais l'inquiétude que génère ce surplus de travail, mais la dynamique d'après thèse ne pouvait que m'amener à fournir cet effort…

Et je terminerai par Margaux, à qui j'avais promis dans les remerciements de la thèse en 2019 « Les absences, les soirées et les weekends passés à travailler ne seront qu'un lointain souvenir. »…raté, la promesse n'a pas été tenue. Alors je ne vais pas la réitérer, car je ne suis pas sûr de la tenir, mais partons du principe qu'après la HDR, il n'y a pas d'autres « diplômes » qui imposent une telle charge de travail. Merci pour ton soutien, ta compréhension. Tes relectures ont largement contribué à améliorer ce mémoire, il t'est entièrement dédié.

« Il faut d'abord savoir ce que l'on veut, il faut ensuite avoir le courage de le dire, il faut ensuite l'énergie de le faire. »

Georges Clemenceau

« Quand tout semble aller contre vous, rappelez-vous que l'avion décolle contre le vent, pas avec lui. »

Henry Ford.

Sommaire

Remerciements 3
Sommaire 9
Tables des illustrations 15
Tables des tableaux 16
Résumé 19
Abstract 20
I. PARCOURS ACADEMIQUE ET INDUSTRIEL 25
1. Introduction 25
1.1. Curriculum Vitae 25
1.1.1. Etat civil 25
1.1.2. Situation professionnelle actuelle 25
1.1.3. Chronologie du parcours de formation, d'enseignant et industriel 26
1.1.4. Cursus Universitaire 28
1.1.5. Cursus professionnel 29
1.1.6. Thématique et mots clés de recherche 29
1.2. Exposé des activités 29
1.2.1. Activités de recherche 29
1.2.1.1. Stage de 1ère année de cycle ingénieur (septembre 2012 – février 2013) 29
1.2.1.2. Ingénieur de Recherche contractuel - IGR (octobre 2014 – janvier 2016) 30
1.2.1.3. Thèse de doctorat 30
1.2.1.4. Chercheur associé – UBFC (depuis Janvier 2020) 31
1.2.1.5. Activités de recherche avec POLYAERO 32
1.2.2. Activité d'enseignement 33
1.2.2.1. Expériences en enseignement 33
1.2.2.2. Activités d'enseignement à l'UTBM (2014-2018) 35
1.2.2.3. Activités d'enseignement à Polyaero -AMU (Depuis 2018) 35
1.2.2.4. Activités d'enseignement à l'IUT GMP – AMU (depuis 2022) 35
1.2.2.5. Activités de formation à Airbus Helicopters (Depuis 2018) 36
1.2.2.6. Activités d'enseignement au département Psychologie (depuis 2020) 36
1.2.3. Encadrement de Thèse 36
1.2.4. Responsabilités administratives et collectives 38
1.2.4.1. Universitaire 38
1.2.4.2. Entreprise 38
1.3. Valorisation des travaux de recherche 40
1.3.1. Revues internationales avec comité de lecture (ACL) 40

1.3.2. Congrès internationaux avec comité de lecture et actes (ACTI) 41
1.3.3. Congrès nationaux avec comité de lecture et actes (ACTN) 42
1.3.4. Poster 43
1.3.5. PT - publications de transfert 43
1.4. Prix 44
2. Itinéraire personnel, industriel et scientifique 45
3. Projet d'HDR sur l'intégration des Facteurs Humains en conception de la maintenance 48
3.1 Bilan des travaux scientifiques réalisés 48
3.2 Motivations de l'HDR 49
3.3 Intérêts scientifiques de cette HDR 50
4. Conclusion et organisation du document 53
II. DE LA MAINTENABILITE VERS LA MAINTENANCE (approche proactive) 57
1. Introduction 57
2. Principes de la maintenabilité 57
3. Historique de l'ergonomie et des Facteurs Humains en maintenabilité 60
3.1. Approches générales 60
3.2. Stratégies et outils historiques pour déployer l'ergonomie et les Facteurs Humains en maintenabilité 62
4. Nouvelles approches pour mieux intégrer l'EFH en maintenabilité 64
4.1. Anticiper pour préserver la santé et la sécurité des opérateurs de maintenance 64
4.1.1. Contexte industriel 64
4.1.2. Méthodes pour répondre à la problématique de recherche 65
4.1.3. Résultats majeurs 67
4.2. Anticiper pour éviter les erreurs humaines 68
4.2.1. Contexte industriel 68
4.2.2. Méthodes pour répondre à la problématique de recherche 69
4.2.3. Résultats majeurs 70
4.3. Discussion générale couvrant les deux thèses entre 2016 et 2022 71
4.3.1. Diagnostic global 71
4.3.2. Voies d'amélioration pour mieux intégrer l'EFH en maintenabilité 72
5. Conclusion 74
III. DE LA MAINTENANCE VERS LA MAINTENABILITE (approche rétroactive) 81
1. Introduction 81
2. Sécurité au travail, quelques généralités (chiffres et réglementation) 82
2.1. Impact global des maladies professionnelles 82
2.2. Liens entre TMS et activité de travail 83
2.3. Stratégie de prévention des TMS 84
3. La maintenance, un contexte opérationnel complexe et changeant 85

4. Compréhension de la pénibilité des opérateurs de maintenance 87
4.1. Dimension physique et cognitive : des tâches de maintenance contraignantes 88
4.1.1. Contexte de l'étude 88
4.1.2. La charge physique et la charge cognitive, éléments nécessaires à la compréhension de l'activité de maintenance 88
4.1.3. Etude menée au sein d'Airbus 89
4.1.4. Conclusion de l'étude 94
4.2. Les tâches d'inspection : complexité et savoir-faire 94
4.2.1. Contexte industriel de l'étude 96
4.2.2. Etude menée au sein d'Airbus 98
4.2.3. Conclusion de l'étude 104
4.3. Analyses des erreurs humaines en maintenance 104
4.3.1. Contexte et étude 104
4.3.2. Conclusion de l'étude 107
5. L'analyse d'incidents/d'accidents 109
5.1. Généralités 109
5.2. Des modèles d'analyse existants 111
5.2.1. Aide à la décision en cas d'erreur de maintenance (MEDA ou « Maintenance Error Decision Aid ») 111
5.2.2. Système d'analyse et de classification des facteurs humains (HFACS ou « Human Factors Analysis and Classification System ») 113
5.3. Conclusion de l'étude 115
6. Synthèse et perspectives 116
6.1. Diagnostic global 116
6.2. Voies d'amélioration pour mieux comprendre la variabilité de l'activité de maintenance 118
7. Conclusion 118
IV. SIMULATION EN AERONAUTIQUE – VECTEUR COMMUN POUR CONCEVOIR ET FORMER 123
1. Introduction 123
2. De la conception des cockpits à la conception de la maintenance 123
3. Les outils de simulation en maintenabilité à des fins d'analyses de l'Ergonomie et des Facteurs Humains 128
3.1. Outils de simulation courants 129
3.2. Nouveaux usages d'outils digitaux pour la simulation d'activité 131
4. Outils de simulation : adaptabilité à tous les contextes, même de crise sanitaire 137
5. La simulation comme support de l'analyse ergonomique et support pédagogique 140
6. Synthèse et perspective 145
7. Conclusion 146
V. SYNTHESE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION 151
1. Introduction 151

2. Synthèse générale 151
2.1. Constats et besoins 151
2.2. Phase proactive 152
2.3. Phase rétroactive 153
2.4. Simulation et pédagogie 154
2.5. Modèle général et macroscopique de l'intégration de l'EFH en maintenabilité 155
3. Perspectives à court terme (2 à 4 ans) 157
3.1. Capitalisation et pédagogie / sensibilisation en entreprise : systématisation et rappel 157
3.2. L'anticipation des erreurs humaines par la voie de la simulation 158
3.3. Résilience et adaptation en cas de crise pour rester efficient dans l'analyse EFH 161
4. Perspectives à moyen terme (4 à 8 ans) 162
4.1. Capitalisation et référentiel du travail réel en maintenance 162
4.2. Favoriser le travail collaboratif, entre ergonomes dédiés à la conception de la maintenance 164
5. Perspectives à long terme (> 8 ans) 166
5.1. Garder le contrôle de la discipline de l'Ergonomie et des Facteurs Humains 166
5.2. Maîtriser la diversité et la variabilité des connaissances des outils de simulation digitaux 167
6. Conclusion 168
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 171
ANNEXE 1 193
ANNEXE 2 194

Tables des illustrations

Figure 1: Chronologie du parcours de formation, d'enseignant et industriel. 27
Figure 2: Remise de l'HeliOffshore Safety Award par les instances Airbus. 44
Figure 3: Représentation des trois voies principales pour intégrer l'EFL (Ergonomie et Facteurs Humains) dans le processus de conception en maintenabilité. 62
Figure 4: Schématisation de la temporalité des deux thèses de doctorat CIFRE menées au sein du département maintenabilité d'Airbus Helicopters 64
Figure 5: Modèle conceptuel de la démarche d'analyse ergonomique PEAM (Bernard, 2019 ; Bernard 2023). Les scores A, B, C et D sont les scores couramment utilisés pour identifier les risques pour l'opérateur et pour l'intégrité de l'hélicoptère (A signifiant aucun risque, D signifiant une très forte probabilité de blessure et/ou d'impact sur l'architecture de l'hélicoptère). 66
Figure 6: Modélisation de la thèse défendue autour de l'étude des Situations à Enjeux de Sécurité ou « SES » – Construction de la sécurité (Murie, 2022). 69
Figure 7: Représentation des trois voies principales pour intégrer l'EFH (Ergonomie et Facteurs Humains) dans le processus de conception en maintenabilité. La voie 2 (rouge) ayant été étudiée entre 2016 et 2019, la voie 1 ayant été explorée entre 2019 et 2022 et la voie 3 n'ayant pas été étudiée 76
Figure 8 : exemple de tâches de maintenance réalisées dans différentes conditions et sur différentes parties d'un hélicoptère. 86
Figure 9: NH90 d'Airbus Helicopters exploité par l'Aviation légère de l'Armée de Terre (ALAT). 90
Figure 10: Postures principales de chacune des quatre tâches sélectionnées pour la réalisation de l'expérimentation. 90
Figure 11: Comparaison de la fréquence cardiaque des trois groupes d'opérateurs (5 - 1, 2, 4, 6 - 3, 7) en fonction des cinq séquences de l'expérimentation (Friedman * : $p \leq .05$; ** : $p \leq .01$; *** : $p \leq .001$) (Bernard et al., 2021). 92
Figure 12: Exemple d'endoscope composé d'une cellule avec un écran, et d'une caméra localisée au bout d'un câble qui peut faire plusieurs mètres. 96
Figure 13: Exemple d'usage d'un endoscope pour réaliser une inspection sur un hélicoptère. 96
Figure 14: Hélicoptère H130 avec un exemple de tête rotor montrant la pièce à vérifier, appelée « plateau cyclique ». 97
Figure 15: Représentation du plateau cyclique conforme à son positionnement sur hélicoptère, induisant ainsi les mêmes conditions pour l'opérateur, en termes de posture. 100
Figure 16: Positionnement des plateaux cycliques pour chacune des quatre sessions. 101
Figure 17: Pourcentage de détection des dommages, tous opérateurs confondus. 103
Figure 18: Matrice des risques de Cox utilisée dans la méthode HHA pour évaluer les risques de chaque tâche de maintenance, 2008. 105
Figure 19: Modèle conceptuel du MEDA. 112
Figure 20: Catégories et taxonomies associées pour remplir la check-list MEDA. 112
Figure 21: Etapes composant le processus d'analyse d'évènements HFACS. 114
Figure 22: Rappel de la Figure 7 évoquée en conclusion du chapitre II. 119
Figure 23: Un des tous premiers simulateurs de vol dans les années 1900. 124
Figure 24: Avion biplan ayant subi un accident suite à l'apparition d'un phénomène vibratoire généré par une non maîtrise de l'appareil. 124
Figure 25: Link Trainer développé en 1930 par Edin Albert. 125
Figure 26: Link Trainer exploité par l'US Air Force, au Texas, pour la formation des pilotes. 126
Figure 27: Premier prototype du simulateur de « Bell and the Western Electric Company ». 126
Figure 28: Premier prototype du simulateur de « Curtiss-Wright Corporation ». 127
Figure 29: Exemple de système haptique pour l'entraînement d'actes chirurgicaux. 130
Figure 30: Environnement tangible lors d'une simulation en réalité virtuelle. 131
Figure 31: Marchepied pliable sur le fuselage d'un hélicoptère. 132
Figure 32: Inspection avant vol du rotor d'un hélicoptère type H125. 134

Figure 33: Usage d'un casque de réalité augmentée (Hololens, Microsoft) dans l'industrie. 135
Figure 34: Configuration de deux casques de réalité augmentée, l'un pour le participant réalisant la tâche et l'autre pour l'observateur. 136
Figure 35: Modèle de la préparation d'une analyse ergonomique et de sa passation dans un contexte de travail distancié, en utilisant les technologies de communication de visio-conférence et les technologies de simulation de réalité virtuelle (Bernard et Loup-Escande, 2023). 140
Figure 36: Plateforme de Réalité Virtuelle avec un étudiant simulant une tâche de maintenance. ... 144
Figure 37: Étudiants travaillant sur un logiciel de conception assistée par ordinateur pour préparer l'analyse des facteurs humains sur une plate-forme virtuelle. 144
Figure 38: Proposition de processus global pour favoriser l'intégration de l'Ergonomie et Facteurs Humains en maintenabilité, tenant compte du cycle universitaire / de formation et du cycle de vie du produit dans son ensemble ainsi que des outils de simulation de l'activité. 156
Figure 39: Localisation des centrales inertielles sur le corps et descriptif du poste de travail appelé « nettoyage des filtres ». 163

Tables des tableaux

Tableau 1: Membres du jury de thèse de Fabien Bernard 31
Tableau 2: Synthèse des disciplines enseignées à l'université - UTBM 34
Tableau 3: Synthèse des disciplines enseignées à l'université - AMU 34
Tableau 4 : Synthèse des formations enseignées en entreprises (Airbus) 34
Tableau 5: Membres encadrant la thèse de Camille Murie. 36
Tableau 6: Membres encadrant la thèse de Lorrys Berthon. 38
Tableau 7: Indicateurs EFH retenus, outils de mesure et scores associés. 90
Tableau 8: Définition générale des trois types d'inspection visuelle. 95
Tableau 9: Catégories de risques en maintenance. 107

Résumé

La prise en compte de l'ergonomie et des facteurs humains dans les processus de conception reste un enjeu majeur, qui plus est dans le secteur de la maintenance aéronautique. En effet, concevoir une architecture d'aéronef adaptée à l'activité de maintenance, comprenant les outillages associés et les procédures, relève d'un immense défi. La conception d'un système impose de faire des choix, des compromis, face à des critères et des exigences de différents métiers qui souhaitent tous s'imposer les uns par rapport aux autres. Mais, plus que dans n'importe quel autre système de transport, en aéronautique, la maintenance influe sur un paramètre critique : la sécurité des vols. Il convient dès lors de se pencher davantage sur la question de l'ergonomie et des facteurs humains, pour permettre une maintenance sûre, préservant aussi bien la santé et la sécurité de l'opérateur que l'intégrité même de l'aéronef.

C'est dans ce contexte que des travaux de recherche ont été initiés en 2016 au sein de la société Airbus Helicopters, sur le site de l'aéroport de Marignane, en France, plus particulièrement dans le département maintenabilité du bureau d'études. Ce département vise à anticiper, concevoir et améliorer l'activité de maintenance. Pour favoriser l'intégration et le respect des exigences ergonomiques et des facteurs humains, des approches, des méthodes et des outils ont été déployés pour aider les ingénieurs-concepteurs, rarement formés et sensibilisés à cette discipline, à mieux la considérer. Initialement centrées sur la santé et la dimension physique de l'ergonomie, nos recherches se sont rapidement étendues à l'ensemble des dimensions de l'ergonomie, touchant ainsi la dimension cognitive et organisationnelle. Pour améliorer l'anticipation de l'activité future des opérateurs de maintenance, il était nécessaire de mieux exploiter les outils de simulation physiques et digitaux tels que la réalité virtuelle. Il a fallu également créer des formations et des documents dans un format pédagogique pour toucher efficacement une large population en bureau d'études.

Ainsi, ce mémoire de HDR vise dans un premier temps à décrire le parcours industriel et d'enseignant-chercheur du candidat. Il s'agira ensuite de synthétiser l'ensemble des travaux de recherche, menés au travers de nombreuses collaborations et partenariats. Enfin, nous nous projetterons à court, moyen et long terme pour poursuivre l'amélioration de l'intégration de l'ergonomie et des facteurs humains dans les phases de conception et réfléchir à une façon de la pérenniser dans des écosystèmes industriels complexes et multi-métiers.

Abstract

Taking into account ergonomics and human factors in design processes remains a major challenge, especially in the aeronautical maintenance sector. Indeed, designing an aircraft architecture adapted to the maintenance activity, including the associated tools and procedures, is an immense challenge. The design of a system requires making choices and compromises, faced with the criteria and requirements of different design office specialties which all wish to impose themselves on each other. But, more than in any other transport system, in aeronautics, maintenance influences a critical parameter: flight safety. It is therefore appropriate to focus more on the issue of ergonomics and human factors, to enable safe maintenance, preserving both the health and safety of the operator and the integrity of the aircraft.

In this context, a research work was initiated in 2016 within the company Airbus Helicopters, on the Marignane airport site, in France, more particularly in the maintainability department of the design office. This department aims to anticipate, design and improve maintenance activity. To promote the integration and respect of ergonomic and human factors requirements, approaches, methods and tools have been deployed to help design engineers, who are rarely trained and sensitive to this discipline, to better consider it. Initially focused on health and the physical dimension of ergonomics, our research quickly extended to all dimensions of ergonomics, thus touching on the cognitive and organizational dimension. To improve anticipation of the future activity of maintenance operators, it was necessary to better exploit physical and digital simulation tools such as virtual reality. It was also necessary to create training courses and documents in an educational format to effectively reach a large population in design offices.

Thus, this HDR dissertation aims initially to describe the candidate's industrial and lecturer-researcher background. It will then be a matter of synthesizing all the research work, carried out through numerous collaborations and partnerships. Finally, we will plan in the short, medium and long term to continue improving the integration of ergonomics and human factors in the design phases and above all, how to sustain it in complex and multi-business industrial ecosystems.

CHAPITRE I

PARCOURS ACADEMIQUE ET INDUSTRIEL

I. PARCOURS ACADEMIQUE ET INDUSTRIEL

1. Introduction

L'Habilitation à Diriger des Recherches doit démontrer des capacités à transférer, à partager les savoirs et savoir-faire dans un domaine technique et scientifique. Elle doit aussi mobiliser ces capacités en vue d'encadrer des doctorants, post-doctorants et ingénieurs dans divers projets de recherche. Nous nous proposons dans cette première partie de développer le Curriculum Vitae du candidat qui comprend à la fois les activités de recherche et les applications industrielles associées qui ont, pour ces dernières, toujours eu pour vocation la mise en application des travaux de recherche.

1.1. Curriculum Vitae

1.1.1. Etat civil

- **Nom** : BERNARD
- **Prénom** : Fabien
- **Né le** : 08 mars 1990 à Poitiers (86)
- **Email** : fabien.bernard@airbus.com
- **Profil Linkedin** : https://www.linkedin.com/in/fabien-bernard/
- **Profil Researchgate** : https://www.researchgate.net/profile/Fabien_Bernard2
- **Google Scholar** : https://scholar.google.com/citations?user=c9CcWVQAAAAJ&hl=en&oi=ao

1.1.2. Situation professionnelle actuelle

- **Intitulé du poste** : Expert (pool) Facteurs Humains et Ergonomie en maintenabilité aéronautique – Airbus Helicopters France et Allemagne

  Adresse : Airbus Helicopters S.A.S, Aéroport International Marseille-Provence, 13725, Marignane Cedex

- **Intitulé du poste** : Vacataire dans plusieurs établissements d'enseignement supérieur à Aix-Marseille Université

  - **Polyaero**, rattaché à l'IUT Génie Mécanique et Productique
    Adresse : Polyaero, aérodrome de gap Tallard, 05130, Tallard
    IUT Aix Marseille Université, 413 Avenue G.Berger, 13100, Aix-en-Provence

  - **Faculté des Sciences du Sport**, Master « Facteurs Humains dans les Interactions avec l'Environnement »
    Adresse : Faculté des Sciences du Sport, Aix-Marseille Université
    163 avenue de Luminy – Case 910 – 13288 Marseille Cédex 9

  - **Faculté de Psychologie**, Master « Ergonomie : facteurs humains et ingénierie des systèmes d'information »

Adresse : Aix-Marseille Université - Maison de la Recherche
29 Avenue R. Schuman - 13628 Aix-en-Provence Cedex 1

1.1.3. Chronologie du parcours de formation, d'enseignant et industriel

La Figure 1 suivante synthétise l'ensemble du parcours de formation, d'enseignant et d'industriel.

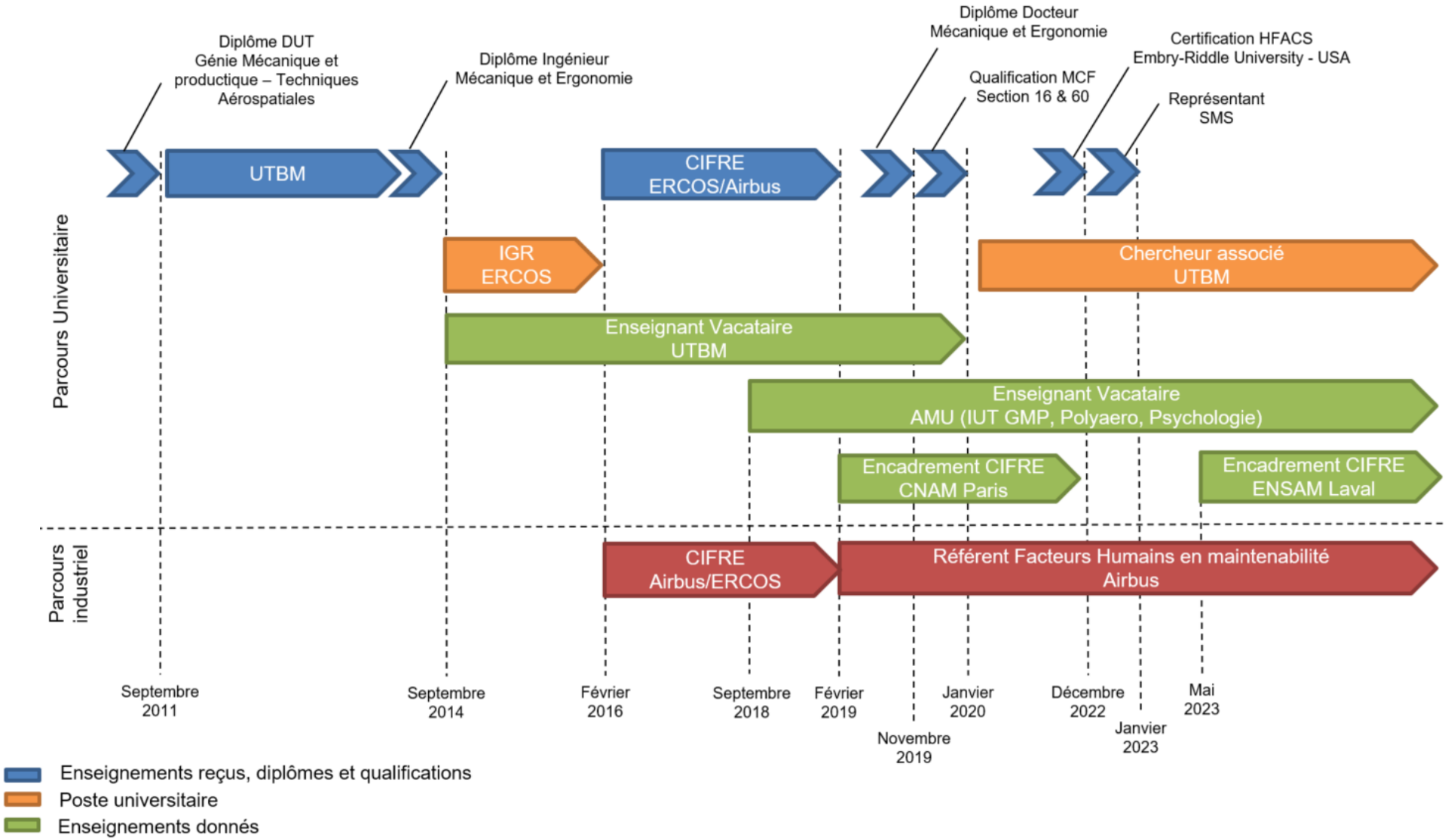


Figure 1: Chronologie du parcours de formation, d'enseignant et industriel.

1.1.4. Cursus Universitaire

1.1.4.1. Enseignements reçus, diplômes et qualifications

- **2008** : Baccalauréat scientifique (Lycée Victor-Hugo à Poitiers).

- **2008/2009**
  CPGE Physique, Technologique et Sciences pour l'Ingénieur
  Lycée Louis Armand, Poitiers (86) - validé : 60 crédits Européens ECTS.

- **2009/2011**
  Diplôme Universitaire de Technologie - Génie Mécanique et Productique des Techniques Aérospatiales à l'Université Paul Sabatier (Toulouse III).

- **2013/2014**
  ERASMUS - Université de Technologie de Tallinn (Estonie).

- **2011/2014**
  Ingénieur en Ergonomie, Design et Ingénierie Mécanique - Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, filière Ergonomie, Innovation et Conception.

- **2016/2019**
  Doctorat en Sciences Pour l'Ingénieur, sous Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) - Université de Technologie de Belfort Montbéliard / Airbus Helicopters.

- **2022**
  Certification « Human Factors Analysis and Classification System » (HFACS), réalisée aux Etats-Unis et dispensée par Embry-Riddle Aeronautical University.

1.1.4.2. Poste Universitaire et enseignement données

- **2014/2020**
  Ingénieur de Recherche contractuel, UTBM, équipe ERCOS.

- **2014/2020**
  Enseignant à l'UTBM, département ERCOS.

- **Depuis 2018**
  Enseignant à Aix-Marseille Université (IUT GMP, Polyaero, Psychologie).

- **Depuis 2018**
  Chercheur associé Université De Bourgogne Franche-Comté, équipe ERCOS de l'UTBM.

- **2019-2021**
  Co-encadrement Thèse CIFRE entre Airbus et le CNAM de Paris.

- **Depuis 2022**
  Co-encadrement Thèse CIFRE entre Airbus et l'ENSAM de Laval.

1.1.5. Cursus professionnel

- **2016/2019**
  Ingénieur en ergonomie, Airbus Helicopters (dans le cadre du contrat CIFRE)
- **Depuis 2019**
  Ingénieur référent Facteurs Humains et Ergonomie / Communauté expert d'Airbus

1.1.6. Thématique et mots clés de recherche

Mes travaux de recherche portent sur l'intégration des Facteurs Humains en conception pour la maintenance aéronautique dans le cadre de l'usage des outils de simulation numériques et physiques d'une part, et traitent de l'évaluation et l'anticipation des erreurs humaines par le biais de la simulation d'autre part.

Mots clés : facteurs humains, ergonomie, conception, maintenabilité, maintenance, simulation numérique (mannequin numérique / réalité virtuelle / réalité augmentée / réalité mixte), erreurs humaines, accidentologie, aéronautique.

1.2. Exposé des activités

1.2.1. Activités de recherche

1.2.1.1. Stage de 1ère année de cycle ingénieur (septembre 2012 – février 2013)

Lieu : Université de Canterbury en Nouvelle-Zélande – Département ingénierie mécanique.

Statut : Stagiaire

Stage intitulé : « *Etude théorique et expérimentale du flottement dynamique sur un avion biplan* ».

Ce stage de recherche portait sur l'étude du flottement dynamique des ailes d'avions biplans avec une :

- Partie analytique :
  - Modélisation en 3D de l'avion biplan (Catia V5) ;
  - Analyse sous modèle numérique (Ansys V13) d'éléments finis avec une configuration différente des ailes (haubans, angles d'attaque…) ;
  - Statistique (Matlab).

- Partie expérimentale :
  - Construction de maquettes d'ailes en matériaux composites ;
  - Test en soufflerie des maquettes (avec capteurs de charge multidirectionnelle et caméra « slow-motion ») ;
  - Comparaison entre les parties analytiques et expérimentales : mise en évidence du flottement "dur" et "doux" ainsi que des fréquences d'apparition du phénomène vibratoire suivant la configuration choisie entre les ailes (haubans, angles d'attaque) et la vitesse de l'avion.

1.2.1.2. Ingénieur de Recherche contractuel - IGR (octobre 2014 – janvier 2016)

Lieu : 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).

Statut : Ingénieur de Recherche contractuel.

Mission : chargé de projets en conception et en ergonomie – enseignements (TD et suivi de projets étudiants).

Mon travail principal consistait à gérer des projets d'ingénierie mécanique et d'ergonomie pour diverses demandes industrielles en France et à l'étranger (Faurecia, Merck Millipore, Ducati Energia, La Poste, Euroglas, Thalès, Airbus, Solvay ...) dans le cadre de la valorisation de la recherche de l'équipe ERCOS (ERgonomie et COnception des Systèmes) :

- Vérification de l'éligibilité du projet entre la demande industrielle et celle du laboratoire ;
- Réalisation de devis, planification et établissement de jalons ;
- Communication avec les clients et les fournisseurs, mais également devant des instances politiques permettant de faire rayonner la recherche française (Annexe 1) ;
- Suivi technique et scientifique (analyse ergonomique, conception centrée utilisateur) ;
- Rédaction de documentation technique.

J'ai également pu mener des projets pédagogiques pour aider les étudiants en ingénierie : TDs, suivi de projets et accompagnement d'étudiants en entreprise.

1.2.1.3. Thèse de doctorat (février 2016 – novembre 2019)

Lieu : travaux de recherche ont conduit dans le cadre d'une thèse de doctorat sous convention CIFRE (Convention Industrielle 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 ».

Statut : Ingénieur - Doctorant

Titre de la thèse : Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation.

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'hélicoptères 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.

Date et lieu de soutenance : 6 novembre 2019 à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).

Tableau 1: Membres du jury de thèse de Fabien Bernard

AOUSSAT Améziane	Professeur des Universités, Arts et Métiers, Paris	Examinateur
BUISINE Stéphanie	Professeure HDR, CESI, Paris-Nanterre	Examinateur
GARRIGOU Alain	Professeur des Universités, Université de Bordeaux	Rapporteur
PAQUIN Raphael	Expert, Responsable de l'équipe maintenabilité, Airbus Helicopters	Invité
RICHIR Simon	Professeur des Universités, Arts et Métiers, Angers	Rapporteur
SAGOT Jean-Claude	Professeur des Universités, UBFC, UTBM, Belfort	Directeur de thèse
ZARE Mohsen	Enseignant-chercheur, UBFC, UTBM, Belfort	Co-encadrant

1.2.1.4. Chercheur associé – UBFC (depuis Janvier 2020)

Lieu : Equipe 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).

Statut : chercheur associé

Mission : A la suite de la thèse, le statut de chercheur associé a permis de pérenniser mes travaux de recherche à travers la poursuite d'expérimentations, de publications et de montages de projets de recherche en partenariat avec Airbus. Plus particulièrement, j'ai poursuivi mes travaux, commencés pendant la thèse, en continuant d'améliorer, d'une part les méthodes pour mieux intégrer les Facteurs Humains auprès de la population du bureau d'études, non sensibilisée à cette discipline et, d'autre

part, en comprenant et améliorant l'usage des outils d'analyse, qu'ils soient de simulation ou de mesure. D'un point de vue industriel, trois projets majeurs nourrissent les travaux de recherche :

- La conduite, en tant que responsable projet et expert, des analyses de plus de 200 situations de travail en 3 ans avec plus de 1500 recommandations faites au bureau d'études afin d'améliorer les procédures, le design et les outillages de maintenance ;
- La participation aux enquêtes d'incidents et d'accidents ayant pour origine des erreurs en maintenance ;
- La participation à la construction d'un standard international, applicable par tous les bureaux d'études, tous les fabricants d'hélicoptères confondus, afin de mieux prendre en compte l'Humain dans les phases de conception de la maintenance.

Tous ces projets industriels et travaux de recherche ont pour objectif premier d'améliorer, de préserver la santé et la sécurité des opérateurs mais également d'assurer la sécurité des vols en réduisant le risque d'erreurs humaines. Pour travailler sur ces deux objectifs et assurer leur pérennité, deux axes développés dans les chapitres suivants se dégagent :

- Construire un référentiel sur la pénibilité ressentie par les opérateurs de maintenance à destination de la population en bureau d'études. Ce travail est mené grâce à l'étude des opérateurs de maintenance et de situations de travail très différentes, en mesurant l'activité de l'Homme. L'analyse des dimensions physiques (physiologiques), cognitives et organisationnelles y est prépondérante. La compréhension des erreurs humaines reste également un enjeu fort dans mes travaux ;
- Comprendre la performance de l'usage des outils de simulation, notamment la réalité virtuelle et la réalité augmentée, pour permettre une étude complète des situations de travail dès les phases de conception de la maintenance. Dans ce cadre, un questionnement global se pose : la validité écologique des simulations au travers des outils digitaux, à des fins d'analyses ergonomiques, peut-elle être très élevée pour s'affranchir totalement des analyses de terrain, plus longues et plus coûteuses ? La réponse a potentiellement un triple enjeu : (1) améliorer les connaissances des outils de simulation pour réaliser des analyses ergonomiques ; (2) convaincre les bureaux d'études de l'intérêt et de la pertinence de ces outils ; (3) promouvoir et convaincre de la pertinence de l'ergonomie pour mieux concevoir. Ce questionnement est d'autant plus complexe qu'il doit aussi tenir compte de l'évolution très rapide des performances des outils de simulation, qui plus est dans un environnement ultra concurrentiel.

1.2.1.5. Activités de recherche avec POLYAERO

La construction pédagogique de cours autour des Facteurs Humains, de la maintenance et de la maintenabilité, au sein du centre POLYAERO, permet de développer des axes de recherche. En particulier, les outils de simulation (comme la réalité virtuelle par exemple) dans un cadre pédagogique sont étudiés afin d'optimiser leurs usages pour améliorer les phases d'apprentissage (Bernard et al., 2021).

1.2.2. Activité d'enseignement

1.2.2.1. Expériences en enseignement

Une expérience de 429 Heures dispensées a été réalisée de la manière suivante :

- **2014 à 2016** : ingénieur de recherche à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) ;
- **2016 à 2018** : vacataire à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) ;
- **2017 à 2018** : tuteur de stage entreprise (6 mois) : « Ergonomie en maintenabilité » ;
- **2018 à aujourd'hui** : vacataire Aix-Marseille Université à l'IUT GMP, en STAPS et en Psychologie.
- **2018 à aujourd'hui** : formateur Airbus (entité hélicoptère) France / Allemagne.

Tableau 2: Synthèse des disciplines enseignées à l'université - UTBM

Année	Département	Niveau	Enseignements	Volume horaire
2014-2015	EDIM	1ere année du cycle ingénieur	TD – Ergonomie (Méthodologie Générale en Ergonomie)	32H
2015	EDIM	2eme année du cycle ingénieur	TD – Ergonomie et conception avancée / Mécanique et ergonomie	32H
2016	EDIM	3eme année du cycle ingénieur	CM – Biomécanique humaine et mannequin numérique	2H
2017	EDIM	3eme année du cycle ingénieur	TD – Biomécanique humaine et mannequin numérique	4H
2018	EDIM	3eme année du cycle ingénieur	TD – Conception à objectif de C02	9H
2018	EDIM	2eme année du cycle ingénieur	CM – Réalité virtuelle pour la conception	2H
2018	EDIM	3eme année du cycle ingénieur	CM – Biomécanique humaine et mannequins numériques	2H
			Total	**83H**

Tableau 3: Synthèse des disciplines enseignées à l'université - AMU

Année	Département	Niveau	Enseignements	Volume horaire
2018-2023	Polyaero	Licence Pro	CM – Généralité sur l'ergonomie en conception	10H
		Licence Pro	CM – Généralité sur les outils de simulation dédiés à l'analyse ergonomique en bureau d'études	10H
		Licence Pro	CM – Histoire de la réalité virtuelle en aéronautique	16H
		Licence Pro	CM – Théorie du mannequin numérique	15H
		Licence Pro	TD – Mannequin numérique & Réalité Virtuelle	189H
2020-2022	STAPS	Master 1 & 2	CM - Ergonomie et facteur humain en maintenance-maintenabilité aéronautique	2H
		Master 2	TD – Questions client : protocole industriel	2H
2021-2023	Psychologie	Master 1	CM – Généralité sur l'ergonomie en conception	6H
		Master 1	TD – Démarche d'analyse ergonomique	6H
		Master 1	CM – Introduction à l'ergonomie physique	6H
2022-2023	IUT GMP	BUT 2	CM - Histoire de la réalité virtuelle en aéronautique	8H
		BUT2	TD – développement de connaissances en simulation digitale	8H
			Total	**278H**

Tableau 4 : Synthèse des formations enseignées en entreprises (Airbus)

Année	Etablissement	Thématique	Volume horaire
2018-2023	Airbus (France)	Evaluer le facteur humain en maintenabilité : sécurité et erreurs humaines	40H
2018-2023	Airbus (France)	Le facteur humain en maintenabilité : généralité et principes	8H
2018-2023	Airbus (Allemagne)	Le facteur humain en maintenabilité : généralité et principes	8H
2023	Airbus (France)	Sécurité aérienne	12H
		Total	**68H**

1.2.2.2. Activités d'enseignement à l'UTBM (2014-2018)

Dans le cadre de mes activités au poste d'ingénieur de recherche (IGR) contractuel entre 2014 et 2016, j'ai assuré l'enseignement de travaux dirigés (TDs) sur la pratique de certains outils d'analyses ergonomiques aux élèves de première année du cycle ingénieur. Ces TDs avaient pour objectif de faire le transfert entre la méthodologie apprise en cours magistraux (CM) et leurs projets du semestre en cours. Egalement, j'ai suivi des projets d'étudiants en « conception pour tous » sous forme de TDs. Mon rôle était de les suivre, de les aider aussi bien d'un point de vue théorique que pratique en leur permettant d'utiliser le matériel disponible au laboratoire. Je les accompagnais également en entreprise lors des observations de terrain.

Dans le cadre de mon doctorat, j'ai eu l'occasion de réaliser d'autres enseignements, aussi bien en TDs qu'en CMs autour de l'ergonomie en maintenabilité, et de la pratique des mannequins numériques en entreprises. J'ai pu également réaliser certains TDs pour apporter mon expertise industrielle dans les projets conduits par les étudiants en conception pour tous.

1.2.2.3. Activités d'enseignement à Polyaero -AMU (Depuis 2018)

Cet enseignement s'adresse exclusivement à des élèves en licence professionnelle ayant pour vocation de devenir technicien supérieur en maintenance aéronautique ou de poursuivre en école d'ingénieur. Mes enseignements initient les étudiants à la prise en compte des Facteurs Humains en conception aéronautique, avec une dominante autour de la maintenabilité. Je réalise d'abord des cours théoriques (analyse ergonomique, collaboration multi-métier, outils de simulation, histoire de la réalité virtuelle en aéronautique, théorie du mannequin numérique), puis des TDs sur l'usage et la pratique des mannequins numériques, plus particulièrement « Human Builders » du logiciel Catia (Dassault System). J'accompagne également les élèves dans leurs projets de réalité virtuelle pour qu'ils puissent saisir les limites et les avantages de chaque outil de simulation numérique. Je réalise et fais passer les examens pratiques et les examens sur table tout au long du semestre.

1.2.2.4. Activités d'enseignement à l'IUT GMP – AMU (depuis 2022)

Suite au remplacement du Diplôme Universitaire de technologie (DUT) par le Bachelor Universitaire de Technologie (BUT), les étudiants ont vu le cursus s'allonger d'une année, passant de deux ans à trois ans. Ainsi, en deuxième année d'IUT GMP à Aix-en-Provence, l'option « Simulation Numérique et Réalité Virtuelle » (SNRV) est proposée aux étudiants en vue de préparer leur spécialité de troisième année. C'est dans ce cadre que j'ai été impliqué pour construire l'option SNRV de deuxième année en proposant notamment un cours et un projet pour les initier à la notion de simulation en aéronautique. Le cours se focalise sur l'histoire de la simulation en aéronautique de 1900 à nos jours. Le projet, en autonomie et en groupe de deux élèves, vise à leur faire rédiger une première bibliographique sur les usages de la Réalité Etendue (Virtuelle, augmentée…) sur des thématiques tirées au sort (médicale, automobile, Travaux publics, militaire, ferroviaire…). Un rapport de 10 à 12 pages est attendu avec un oral de 180 secondes pour chaque groupe. Ce type d'oral leur apprend à synthétiser, vulgariser et communiquer très rapidement sur un sujet, tel qu'ils devront parfois le faire dans le monde industriel.

1.2.2.5. Activités de formation à Airbus Helicopters (Depuis 2018)

Dans un objectif de sensibilisation aux facteurs humains en maintenance, j'organise des formations en France et en Allemagne auprès des différents départements composant le bureau d'études de l'entreprise. Cette formation présente trois axes :

- L'utilité de la prise en compte des facteurs humains en maintenabilité ;
- Les moyens d'y parvenir : outils de simulation et démarche PEAM (« Preliminary Ergonomics Analysis in Maintainability » développée pendant ma thèse et devenue un standard Airbus, synthétisé en chapitre II) ;
- Sensibilisation aux erreurs humaines et à leur anticipation en bureau d'études et plus particulièrement pendant les phases de simulation.

1.2.2.6. Activités d'enseignement au département Psychologie (depuis 2020)

Les cours sont réalisés en Master 1 du cycle Psychologie, parcours « Ergonomie – Facteurs Humains et Ingénierie des systèmes d'information » (EFHISI). Les cours se focalisent surtout sur des exemples concrets de la pratique de l'ergonomie en environnement industriel. Des travaux dirigés ont également lieu et ont pour objectif de travailler sur des problématiques réelles. Ils doivent ainsi - au moyen de documents que je leur fournis contextualisant le sujet - reformuler la demande puis proposer une démarche d'analyse adéquate. A chaque étape, je confronte chacune de leur proposition et je présente ce qui a réellement été déployé en entreprise.

1.2.3. Encadrement de Thèse

- **Co-encadrant de la thèse de doctorat de Camille Murie (février 2019 – mai 2022)** – Convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) au sein du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) de Paris, hébergé par le laboratoire Centre de Recherche sur le Travail et le Développement (CRTD). Les travaux sont réalisés avec Airbus Helicopters.

  Thèse intitulée : *« Articuler sécurité réglée et sécurité gérée dans les compromis de conception: une approche croisée du travail de concepteurs et de mécaniciens pour une maintenance aéronautique sûre. »*

Tableau 5: Membres encadrant la thèse de Camille Murie.

BARCELINI Flore	Professeur des Université – ergonomie , CNAM Paris	Directrice de thèse
BUCHMANN Willy	Maître de Conférences – ergonomie, CNAM Paris	Co-encadrant
CUVELIER Lucie	Maître de Conférences – ergonomie, Paris 8	Co-encadrant
BERNARD Fabien	**Expert, PhD, facteurs humains/maintenabilité, Airbus**	**Co-encadrant**
PAQUIN Raphael	Expert, maintenabilité et facteurs humains, Airbus	Co-encadrant

Résumé : Notre recherche s'ancre dans la demande industrielle d'un constructeur d'hélicoptères centrée sur la diminution du risque d'erreurs en maintenance aéronautique à travers la conception d'une maintenance sûre. Cette demande s'inscrit dans une vision classique de la sécurité (Hollnagel et al., 2015), considérant la sécurité comme l'absence de risque ; vision qui a contribué à la construction d'une industrie aéronautique considérée

comme ultra-sûre. Cette vision classique de la sécurité est discutée par les champs d'étude de la sécurité et l'ergonomie de l'activité depuis plus d'une dizaine d'années. Cette thèse s'inscrit dans ces approches : elle porte une vision constructive de la sécurité et s'appuie sur les concepts de sécurité en action et de sécurité réglée et gérée (SR/SG) (Morel et al., 2008 ; de Terssac & Gaillard, 2009). Notre thèse explore l'articulation SG/SR en interrogeant, de façon croisée, l'activité de concepteurs en maintenabilité et celle de mécaniciens. Pour assurer la sécurité aérienne, les ingénieurs-concepteurs et les mécaniciens font face à des situations de conflits de contraintes, que nous appelons des Situations à Enjeux de Sécurité (SES). Nous cherchons à comprendre les modalités de gestions de ces conflits de contraintes à travers le prisme de la construction de compromis micro et macro-centrés (Amalberti, 2013). Nous identifions et analysons les SES dans les situations de travail de conceptions en maintenabilité (premier chapitre empirique) et des mécaniciens (deuxième chapitre empirique). Ceci nous permet de montrer que les modèles de sécurité mobilisés par les ingénieurs-concepteurs et les mécaniciens, pour concevoir et agir en sécurité, entrent en conflit. D'une part, les ingénieurs-concepteurs cherchent à construire des compromis micro-centrés (ex. contraintes du travail des mécaniciens à intégrer dans la conception) et macro-centrés (ex. ajustement aux contraintes des autres acteurs de la conception) pour concevoir des solutions (ex. modification de design) qui permettent aux mécaniciens d'appliquer les procédures « de façon sécurisée », c'est-à-dire en se conformant à la procédure. Les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité cherchent donc à supprimer l'écart entre la sécurité réglée et gérée jugé comme étant à risque. D'autre part, agir en sécurité pour les mécaniciens revient à opérer des compromis micro-centrés entre respect stricte des procédures et préservation d'une relation de service de qualité auprès des opérateurs de vol : les mécaniciens sont amenés à adapter les procédures pour assurer, en sécurité, le service de maintenance, ce qui implique un écart aux procédures. Ce constat nous amène à proposer une démarche de conception participative d'une maintenance sûre– la démarche Contraintes/Stratégies/Ressources (CSR) - soutenant le dialogue entre ingénieurs-concepteurs et mécaniciens pour l'articulation SR/SG (Cuvelier et Woods, 2019). Le troisième chapitre empirique décrit la mise en place de cette démarche et les premiers résultats de son usage en conception de la maintenance. Nous identifions des contraintes organisationnelles (ex. l'imprévisibilité de la maintenance) limitant la mise en place d'une telle démarche au sein d'une organisation ultrasûre et ultra-réglée. Si les premiers usages montrent bien une mise en discussion de la sécurité gérée pour concevoir la sécurité réglée, ces discussions ne visent qu'une articulation cherchant à réduire l'écart entre sécurité réglée et gérée, cet écart étant toujours considéré comme un risque. Ces résultats nous amènent à discuter le sens des modèles de sécurité pour les ingénieurs-concepteurs et les mécaniciens en lien avec les critères de qualité de leur travail. Ils ouvrent également des perspectives sur l'accompagnement de l'évolution des organisations ultrasûres du rejet de l'écart entre SR/SG vers une mise en dialogue SR/SG.

- **Co-encadrant de la thèse de doctorat de Lorrys Berthon (depuis mai 2023)**. Convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) au sein du Laboratoire Angevin de Mécanique, Procédés et innovAtion (LAMPA), hébergée par l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers (ENSAM) d'Angers. Les travaux sont réalisés avec Airbus Helicopters.

Thèse intitulée : « *Simulation de l'activité de maintenance au travers d'outils digitaux : anticipation des erreurs humaines.* »

Tableau 6: Membres encadrant la thèse de Lorrys Berthon.

RICHIR Simon	Professeur des Universités, Réalité Virtuelle, Angers	Directeur de thèse
FLEURY Sylvain	Maître de Conférences – ergonomie, Angers	Co-encadrant
BERNARD Fabien	**Expert, PhD, facteurs humains/maintenabilité, Airbus**	**Co-encadrant (Universitaire et Industriel)**
PAQUIN Raphael	Expert, maintenabilité et facteurs humains, Airbus	Co-encadrant industriel

Résumé : ce sujet de thèse reste dans la continuité des travaux de recherche déjà réalisés autour des outils de simulation (VR, maquette physique etc) et les analyses Facteurs Humains. Plus particulièrement, ce nouveau sujet traitera notamment de la capacité des outils de simulation à mesurer la dimension cognitive (mémoire à court/long terme, raisonnement, perception de l'environnement etc) et comment restituer nos conclusions pour impacter durablement le design, les outillages, et les procédures dédiées à la maintenance des hélicoptères.

1.2.4. Responsabilités administratives et collectives

1.2.4.1. Universitaire

Dans le cadre de mes activités universitaires, mes missions principales concernent :

- Depuis 2019 : responsable d'unités d'enseignement avec le développement de cours magistraux et de travaux dirigés autour de l'ergonomie en conception au sein de POLYAERO, l'IUT GMP d'Aix-Marseille Université ainsi que pour le département Psychologie de cette même université ;
- Depuis 2019 : assurer la création de projets étudiants concrets et pragmatiques entre le monde de l'entreprise et le monde universitaire.
- Depuis 2022 : Participation à des projets de recherche (précisions apportées en 3.1 de ce chapitre I) :
    - Projet porté par la fédération CRISIS, la Maison de la Recherche et Aix-Marseille Université : « Fiabilisation des mesures physiques par l'approche ergonomique des FOH : le cas du CND (Contrôle Non Destructif) dans les installations nucléaires ».
    - Projet porté par le pôle ERCOS du laboratoire ELLIADD (E.A. 4661) de l'Université de Bourgogne Franche-Comté. Le projet s'appelle CONTINUUM (Continuité collaborative du numérique vers l'humain).

Dans le cadre de mes activités à Aix-Marseille Université, je suis membre d'un jury d'évaluation d'élèves pilotes de l'armée Qatarie en partenariat avec Défense Conseil International (DCI). J'ai intégré ce groupe pour la première fois en 2019. L'objectif est de faire passer la validation des acquis de l'expérience (VAE).

1.2.4.2. Entreprise

En tant que spécialiste facteurs humains pour la maintenabilité chez Airbus Helicopters (France et Allemagne), j'ai plusieurs rôles d'expertise :

- En 2018 : Encadrement d'un stagiaire en entreprise, comptant pour un stage de fin d'études, encadré à 100% en entreprise. Le sujet portait sur la conception d'éléments physiques à synchroniser avec la réalité virtuelle pour améliorer les analyses ergonomiques et l'expérience utilisateur en réalité virtuelle ;
- Depuis 2018 : Développement, formation et diffusion de la démarche PEAM développée initialement pendant la thèse, PEAM étant devenu un standard ;
- Depuis 2019 : Référent pour l'évaluation des facteurs humains à travers la simulation : initier et justifier les nouveaux besoins utilisateurs ;
- Depuis 2020 : Membre de l' « Aviation Safety » pour l'analyse des incidents majeurs et des accidents liés à des erreurs de maintenance : mise en place de protocoles d'investigation avec les autorités compétentes ;
- 2019-2022 : Co-encadrement de la thèse CIFRE de Camille Murie ;
- Depuis 2023 : Co-encadrement d'une thèse CIFRE de Lorrys Berthon *;*
- Depuis 2020 : Gestion de la sous-traitance en facteurs humains pour le département maintenabilité (sociétés APSYS et HDG).

1.3. Valorisation des travaux de recherche

1.3.1. Revues internationales avec comité de lecture (ACL)

L'annexe 2 détaille l'ensemble des articles principaux.

1. Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017). "Consideration of Human Factors in aeronautical maintainability". Annual Reliability and Maintainability Symposium. (IEEE.), Orlando, USA, p37-43 [SCimago].
   https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889653

2. 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.
   https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.003

3. Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C., Paquin, R (2019). 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

4. Bernard, F., Zare, M., Sagot, J.-C., & Paquin, R. (2020). Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability. Human Factors, 62(1), 37-54.
   https://doi.org/10.1177/0018720819861496

5. Bernard, F., Zare, M. Murie, C. & Sagot, J.-C. (2021). Dimensions physiques et cognitives : vers une nécessaire prise en compte en maintenabilité aéronautique. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 82(2), 170-183.
   https://doi.org/10.1016/j.admp.2020.10.004

6. Murie, C., Barcellini, F., Buchmann, W., Cuvelier, L., Bernard, F., Paquin, R. (2021). Analyser les risques en maintenance aéronautique, un projet complexe de conception. Actes du 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. Revue Activité (Paris, France), 11-13 janvier [Ergonomics Abstract].
   https://hal-cnam.archives-ouvertes.fr/hal-03186748

7. Bernard, F., Bonnardel, X., Paquin, R., Petit, M., Marandel, K., Bordin, N., & Bonnardel, F. (2022). Digital simulation tools in aviation maintainability training. Computer Applications in Engineering Education, 30(2), 384-395.
   https://doi.org/10.1002/cae.22461

8. Paquin, R. and Bernard, F. (2023). Augmented reality to perform human factors analysis in maintainability. Int. J. Human Factors Modelling and Simulation, Vol. 8, No. 1, pp.76–95.
   https://doi.org/10.1504/IJHFMS.2023.10054452

9. Bernard, F., Zare, M., Paquin, R., & Sagot, J. C. (2023). A new approach for human factors integration into design for maintenance: a case study in the aviation industry. International Journal of Human Factors and Ergonomics, 10(2), 144-164. https://doi.org/10.1504/IJHFE.2023.130537

10. Bernard, F. & Loup-Escande, É. (2023). Préparation des analyses ergonomiques en bureau d'études aéronautique : résilience et adaptation en temps de crise. Le travail humain, 86, 69-93. https://doi.org/10.3917/th.861.0069

11. Fleury, S., Bernard, F., Paquin, R., Blanchard, P., Richir, S. (2023). Augmented and virtual reality simulation in industry. Computer, 56(12), 55-64. https://doi.org/10.1109/MC.2023.3283311

12. Bernard, F. & Jahchan, N. (2024). Enhancing Helicopter Aviation Safety through Collaborative Integration of Human Factors in Maintainability and Technical Documentation Design: A Case Study for Closing the Organizational Gap. International Journal of Human Factors and Ergonomics. Soumis Janvier 2024.

1.3.2. Congrès internationaux avec comité de lecture et actes (ACTI)

1. Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., Sagot, J.C. (2017). "Consideration of Human Factors in aeronautical maintainability". Annual Reliability and Maintainability Symposium. (IEEE.), Orlando, USA, p37-43 https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889653

2. Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2019). Virtual reality simulation and ergonomics assessment in aviation maintainability. In Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018) Volume V: Human Simulation and Virtual Environments, Work With Computing Systems (WWCS), Process Control 20 (pp. 141-154). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15

3. Murie, C., Buchmann, W., Cuvelier, L., Barcellini, F., Bernard, F., & Paquin, R. (2021, May). Acting in Safety from the Design to the Implementation of Helicopter Maintenance. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 128-135). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-74611-7_18

4. Bernard, F., Paquin, R., Devilliers G., Zare M. (2022). Methodology proposal to better integrate Human Factors in aviation maintenance. Paper presented at Vertical Flight Society's 78th Annual Forum and Technology Display. Dallas, USA. https://doi.org/10.4050/f-0078-2022-17510

5. Paquin, R., Bernard, F. (2022). Use of augmented reality for hybrid mock-up validation in aviation maintainability. 48th European Rotorcraft Forum, Winterthur, Switzerland.

6. Bernard, F., Paquin, R., Dos-Santos, K. (2023). Human Errors in Helicopter Maintenance: overview of recommendations for improving safety. In: Isabel L. Nunes (eds) Human Factors and Systems Interaction. AHFE (2023) International Conference. AHFE Open Access, vol 84. AHFE International, USA.
   http://doi.org/10.54941/ahfe1003617

7. Berthon, L., Bernard, F., Fleury, S., Paquin, R., Richir, S. (2024). Mental workload: a prerequisite for future maintenance design. Human Factors and Simulation. AHFE (2024) International Conference. AHFE Open Access. AHFE International, USA.
   http://doi.org/10.54941/ahfe1005025

8. Bernard, F., Paquin, R., Berthon, L., Lillo F. (2024). How Maintenance Can Be Better Designed To Avoid Human Errors: A Case Study In The Helicopter Industry As An Introduction. In Proceedings of the 22th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2024). Présenté en août 2024.

9. Zare M., Jaffel N., Bernard F., Baume H. (2024). Impact of neck support in headrests for enhancing relaxation and comfort. In Proceedings of the 22th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2024). Présenté en août 2024.

1.3.3. Congrès nationaux avec comité de lecture et actes (ACTN)

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Murie, C., Buchmann, W., Cuvelier, L., Barcellini, F., Bernard, F., Paquin, R. (2019). Accéder au réel du travail de maintenance sur hélicoptère. Les Doctoriales Epique 2019 : L'ergonomie et les nouvelles technologies, Lyon, France.

6. Murie, C., Barcellini, F., Buchmann, W., Cuvelier, L., Bernard, F., Paquin, R. (2021). Analyser les risques en maintenance aéronautique, un projet complexe de conception. Actes du 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. Paris, 16, 17 et 18 septembre 2020.

1.3.4. Poster

1. 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.

2. Murie, C., Barcellini, F., Buchmann, W., Cuvelier, L., Bernard, F., Paquin, R. (2019). Construire la sécurité de maintenance sur helicoptères, à l'interface du travail des ingénieurs de maintenabilité et des mécaniciens de maintenance, Poster pour les doctorales du séminaire du CRTD, 2019

1.3.5. PT - publications de transfert

1.3.5.1. Conventions signées avec des institutions[1]

1. BERNARD F., SAGOT J.C. (2015). Développement et la mise en valeur du territoire. Convention Pays de Montbéliard Agglomération (Montbéliard, 25).

1.3.5.2. Conventions signées avec des industriels[2]

1. BERNARD F., MAYSSE J., SAGOT J.C. (2015). Etude ergonomique et développement d'un chariot manuel pour le transport des butées. Convention Euroglas (Hombourg, 68), 10p.

2. ROGER M., BAZZARO F., MAYSSE J, BERNARD F., BAUME H. (2015). Etude, Réalisation et évaluation d'un démonstrateur intégrant des technologies et services innovants pour l'info valorisation des véhicules blindés. Projet Vivéa, Convention Thalès (Gennevilliers, 92).

3. BERNARD F., SAGOT J.C. (2015). Démarche ergonomique concernant plusieurs situations de travail à l'origine de TMS. Etude et optimisation d'une capsule (produit pharmaceutique). Convention Merck Millipore (Molsheim, 67).

[1] Convention signée annuellement entre l'UTBM et l'agglomération du pays de Montbéliard, permettant d'assurer des liens et des partenariats entre le monde universitaire et le paysage industriel local.
[2] Convention signée directement entre l'UTBM et un industriel pour assurer une prestation dans le cadre de la valorisation de la recherche. Cette convention impose un livrable (produit / concept / service) à l'entreprise, en parallèle ce projet nourrit les travaux de recherche de l'équipe ERCOS.

1.3.5.3. Développements instrumentaux et méthodologiques / Prototypes & démonstrateurs

1. BERNARD F., LARIQUE M., SAGOT J-C, (2015). Prototype pré-série de chariot pour le port de charges lourdes. Contrat UTBM – Euroglass.

2. BERNARD F., LARIQUE M., JAEGERT D., BAUME H., SAGOT J-C, (2014). Maquette fonctionnelle de poignée pour agrafeuse industrielle. Contrat UTBM – Faurecia.

1.3.5.4. Séminaires invités

1. BERNARD F., MURIE C. (2020). Conception de la maintenance future : Quelle est la place de l'humain, de l'opérateur de maintenance, de l'ergonomie pour les acteurs-métiers en bureau d'études ? Séminaire organisé par ERGOPACA, Maison de la médecine du travail, Aix-en-Provence.

2. BERNARD F. (2023). Ergonomie de conception : anticiper et optimiser le Contrôle Non Destructif sur hélicoptères. Séminaire organisé par la fédération CRISIS et l'InCIAM, Maison de la recherche, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence.

3. BERNARD F. (2024). Keynote speaker. 31ème Colloque International des Sciences de la Conception et de l'Innovation, Porto, Portugal.

1.4. Prix

1. 2016, Best Paper Award, CONFERE 2016, Prague.
2. 2017, PhD Day, Best « my thesis in 3 minutes » speaker, Airbus Bristol.
3. 2019, "Human error in maintenance" Project team / Quality award, Airbus Helicopters.
4. 2019, "Human factors integration in maintenance", Project team, HeliOffshore.
5. 2023, "Helioffshore Safety Awards 2023".



Figure 2: Remise de l'HeliOffshore Safety Award par les instances Airbus.

2. Itinéraire personnel, industriel et scientifique

La volonté d'approfondir un sujet, de me focaliser sur une thématique donnée pour en comprendre tous les détails a toujours été un besoin, une nécessité. Plus particulièrement, la passion de l'aéronautique m'a toujours poussé à me focaliser sur des sujets dans ce domaine. C'est au cours de mes deux années d'IUT à l'Université Paul-Sabatier de Toulouse, entre 2009 et 2011, que j'ai pu suivre un cours, du moins un préambule, sur les Facteurs Humains en aéronautique. Comprendre l'Homme dans son environnement, comprendre que derrière la technique rien ne peut être utilisé et maitrisé sans l'intelligence de l'Homme, m'a instantanément interrogé, passionné. Comment peut-on s'extraire de la technique, se transposer, pour comprendre l'usage qu'en fera un utilisateur ? A cette période, j'ai commencé à lire des rapports d'enquêtes-accidents aériens rendus publics sur le site internet du Bureau Enquêtes Accidents (BEA) et une conviction ferme est apparue : ma poursuite d'étude doit se faire en jumelant technique et sciences humaines. Au grès des recherches sur internet et de salons de l'étudiant, un département d'une école d'ingénieur a retenu mon attention : le département Ergonomie, Design et Ingénierie Mécanique (EDIM) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).

En 2011, en intégrant ce département, c'était l'assurance de parfaire mes connaissances en ingénierie mécanique et en conception tout en m'initiant à l'apprentissage de l'ergonomie. Aucun doute, la voie était bien la bonne. Mais la volonté de s'approprier un sujet, de l'approfondir ne pouvait passer que par la recherche. Pour découvrir ce monde qui m'était totalement inconnu, j'ai cherché un stage à l'étranger, en laboratoire et centré sur l'aéronautique. Après l'envoi d'innombrables CV, une opportunité s'est dessinée. Et quelle opportunité ! La Nouvelle-Zélande, quasiment 7 mois d'un voyage qui aura sans aucun doute été initiatique, transformant mes pensées, mes visions sur le monde, tout en m'imposant une certitude : ma vie professionnelle passera par la recherche. Mon encadrante à l'Université de Canterbury, Dr. Stefanie Gutschmidt, m'aura fait découvrir toute la richesse intellectuelle que peut apporter la recherche. Le côtoiement permanent de ses doctorants, me poussant dans mes retranchements tout en allant au-delà de mes affirmations préconçues, m'a fait comprendre une chose : le questionnement de soi, le doute permanent sont les seuls facteurs qui peuvent me faire avancer et progresser.

Au cours de ce même voyage, j'ai anticipé mon retour en France en postulant à un semestre ERASMUS que j'ai pu réaliser lors de ma dernière année du cycle ingénieur à l'automne/hiver 2013. Un choix mûrement réfléchi en allant à l'Université de Technologie de Tallinn en Estonie qui proposait des enseignements sur la conception mécanique et l'ergonomie de conception. L'approche nord européenne est différente de celle enseignée en France, avec des simulations d'activités principalement basées sur des maquettages physiques (bois, carton…), avec la création de Persona et des tests utilisateurs très fréquents qui viennent, dans une certaine mesure, compenser la non utilisation d'outils digitaux. Ce sont ainsi de nouvelles méthodes acquises, notamment au travers de leur application dans un projet de terrain à l'Hôpital de Tallinn. Durant cette période, toujours par souci d'anticipation, j'émets mon souhait de poursuivre vers un doctorat à mes encadrants universitaires Français. Morad Mahdjoub, Maître de conférences à l'UTBM soutient grandement ce projet et me propose un potentiel sujet académique, sous financement ANR.

Ce sujet concernait l'intégration de l'ergonomie dans les phases de conception, en exploitant davantage les outils de simulation existants, tels que les outils digitaux comme la réalité virtuelle, accès sur l'optimisation des données d'entrée servant au calcul de structure au travers des éléments finis. Mais, en février 2014, mon stage de fin d'études à Airbus Helicopters, dans le département maintenabilité, a donné un tout autre sens à mon projet de recherche. En effet, le sujet de mon stage portait sur l'optimisation mécanique et fonctionnelle d'un outillage de maintenance servant à déplacer un hélicoptère à patins lorsque celui-ci est posé au sol. J'ai rapidement proposé d'ajouter une étude ergonomique pour optimiser le produit et l'adapter aux utilisateurs finaux. Ce travail a fait émerger l'idée que le sujet de thèse académique pouvait être adapté en thèse CIFRE, dans ce même département. Pouvoir garder un pragmatisme industriel, dans un environnement aéronautique, tout en contribuant à développer des connaissances par la voie de la recherche m'a procuré une grande motivation. Après plusieurs réunions avec Airbus pour convaincre de l'intérêt de mon projet, je me suis lancé, avec l'aide de l'entreprise (Raphaël Paquin) et du laboratoire (Dr. Morad Mahdjoub, Dr. Florence Bazzaro et Pr. Jean-Claude Sagot) dans le montage du dossier administratif. Un long parcours, sinueux, de 20 mois a alors commencé.

C'est à cette période que ma carrière scientifique a réellement commencé. En parallèle du montage du dossier CIFRE, j'ai été engagé comme ingénieur de recherche contractuel au sein de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), dans l'équipe de recherche ERCOS (ERgonomie et COnception des Systèmes). Durant cette période, j'ai pu accomplir trois types de missions :

- Valorisation de la recherche : prospecter au sein d'entreprises du Grand Est, montage de dossiers financiers, suivi des projets et des budgets, faire le lien avec l'équipe de recherche du laboratoire. Ce travail m'a amené à réaliser des analyses ergonomiques dans l'industrie automobile (Peugeot, Faurecia), pharmaceutique (Merk Milliport), militaire (Thales, centre de maintenance de l'Armée de Terre – projet Scorpion), dans l'industrie vitrière (Euroglas) ou encore dans l'énergie (Solvay). Tous ces projets m'ont permis de travailler en collaboration avec des acteurs-métiers de la recherche et de l'industrie. L'apprentissage de nouvelles méthodes rigoureuses, tout en assurant des exigences de temps et de coûts industriels, m'a permis de percevoir l'équilibre et l'apport réciproque entre la recherche et l'industrie.
- Enseignements : pendant cette période, j'ai pu réaliser mes premiers enseignements avec des Travaux Dirigés pour former les étudiants de 1erannée de cycle ingénieur à la méthode d'analyse ergonomique RULA (Rapid Upper Limb Assessment) (McAtamney & Corlett, 1993). J'ai également été tuteur de projets dans lesquels je devais accompagner des groupes d'étudiants sur l'année entière. Cela incluait des visites et des analyses ergonomiques réalisées directement en entreprise.
- Recherche : profitant de l'interface forte avec l'équipe du laboratoire, j'ai réalisé mes premiers travaux de recherche. D'abord pour me former mais également pour renforcer mon dossier de candidature pour la thèse CIFRE. Ce travail a abouti à ma première publication scientifique en conférence (Bernard et al., 2015).

En février 2016, je débute finalement ma thèse de doctorat CIFRE entre Airbus Helicopters et l'équipe ERCOS. Ma première expérience d'ingénieur de recherche a été un atout personnel et professionnel majeur pour « jongler » entre les exigences industrielles et celles de recherche qui parfois s'opposaient, ne serait-ce que sur la temporalité des divers projets et objectifs. Dans ce contexte, l'équilibre a été évidemment difficile à atteindre. Ainsi, pour convaincre de l'utilité des travaux de

recherche, j'ai pris la décision de publier plus que l'exigence minimum tout en assurant des projets industriels qui venaient nourrir ces travaux. Convaincre les deux entités ne pouvait passer, selon mon point de vue, que par la satisfaction indépendante de chaque partie par l'atteinte d'objectifs prédéfinis. D'une part, apporter à l'industrie une vraie plus-value en participant concrètement à des projets en cours, et d'autre part contribuer aux objectifs de recherche du laboratoire en créant, diffusant de nouvelles connaissances et réflexions ainsi qu'en donnant des cours aux élèves ingénieurs. En parallèle, j'ai obtenu un contrat d'enseignant vacataire au sein d'Aix-Marseille Université. Ce parcours, avec le soutien du tuteur industriel (Raphaël Paquin) mais aussi des encadrants de la thèse, m'a permis d'aller au bout de mes objectifs personnels sur cette période : être embauché dans l'entreprise Airbus Helicopters dans la foulée du contrat CIFRE pour poursuivre mes activités industrielles, mais également continuer à faire de la recherche. Plus particulièrement, en étant quelques mois après ma soutenance de thèse, qualifié aux fonctions de Maître de Conférences dans deux sections universitaire distinctes (16 - Psychologie et ergonomie et 60 - Mécanique, génie mécanique, génie civil). Cette double qualification a confirmé l'intégration de mes travaux et des connaissances qui en découlent aussi bien en génie industriel qu'en ergonomie. Également, en ayant convaincu l'équipe industrielle, à la suite de ma thèse, nous avons collectivement poursuivi l'intégration de la recherche en entreprise, en créant un nouveau contrat CIFRE, cette fois avec le CNAM de Paris (Murie et al., 2022) puis un deuxième contrat CIFRE, en cours (démarré en mai 2023), avec l'ENSAM de Laval.

Ce présent manuscrit vise ainsi à décrire et synthétiser l'ensemble des travaux de recherche menés depuis la fin de la thèse de doctorat et les liens forts qui existent entre eux. Également, les perspectives de recherche dans le futur sont décrites, à court, moyen et long terme. En effet, les travaux de recherche menés doivent pouvoir contribuer à la sécurité aérienne qui se renforce constamment au gré des évolutions technologiques et qui nécessite ainsi une adaptation permanente pour toujours réduire les risques d'incidents et d'accidents graves.

3. Projet d'HDR sur l'intégration des Facteurs Humains en conception de la maintenance

3.1 Bilan des travaux scientifiques réalisés

Mes travaux de recherche ont été opérationnalisés au sein de l'industrie mais également au sein du monde universitaire :

- Airbus Helicopters, entreprise qui peut être vue comme le terrain d'application et d'observation :
  - Mise en place de protocoles expérimentaux au travers de très nombreux projets industriels ;
  - Suivi de deux co-encadrements de thèse (un terminé entre 2019 et 2022 avec Camille Murie, l'autre en cours ayant démarré en 2023 avec Lorrys Berthon) ;
  - Suivi de deux encadrements de stagiaires.
- Université de Technologie de Belfort-Montbéliard avec la participation à des projets de recherche et industriels en lien avec la valorisation de la recherche, notamment entre 2014 et 2019. Depuis 2019, je suis impliqué comme ingénieur de recherche dans des projets comme Continuum[3] à l'Université de Bourgogne Franche-Comté et CRISIS[4] à Aix-Marseille Université ;
- Université Aix-Marseille au sein de laquelle des cours sont développés et des travaux de recherche sont menés, notamment pour assurer la mise en place d'un système de formation inductive. L'usage de simulations y est primordial pour contextualiser les environnements industriels.

La partie qui suit vise à synthétiser l'ensemble des travaux qui seront étayés dans les chapitres suivants. Les travaux de recherche ainsi menés depuis 2016 s'articulent autour d'un grand thème majeur : *mieux intégrer les Facteurs Humains pour la conception de la maintenance*. D'abord, un diagnostic de la situation actuelle a été réalisé, en maintenabilité et en maintenance aéronautique, au travers de la littérature tout en profitant du contexte industriel de la CIFRE. Ce diagnostic, central, montre pourquoi les Facteurs Humains sont soit peu pris en compte dans les phases de conception de la maintenance (ou maintenabilité) soit mal pris en compte (Bernard et al, 2019). Également, ce diagnostic a mis en avant que les outils de simulation exploités en maintenabilité par les ingénieurs-concepteurs pour la conception de la maintenance sont des outils communs aux ergonomes. Ainsi, il a été mis en évidence un manque de savoir et de savoir-faire pour intégrer davantage les Facteurs Humains en conception par les non spécialistes en Facteurs Humains, qui représentent la très grande

[3] CONTINUUM qui vise à créer au niveau national un réseau de 30 infrastructures technologiques de pointe dédiées à la visualisation et aux systèmes interactifs immersifs. CONTINUUM constituera un complexe technologique interconnecté unique, basé sur la mise en réseau d'équipes de recherche performantes et de plateformes technologiques de pointe permettant le développement d'une recherche tant fondamentale qu'appliquée dans de nombreux domaines. L'ambition de CONTINUUM est de permettre un changement de paradigme dans la façon dont nous percevons, interagissons et collaborons avec des données numériques complexes et des mondes visuels en plaçant l'humain au centre des flux de traitement des données.

[4] CRISIS (Culture – Représentation – Identité – santé – Interactions Sociales) est une fédération hébergée à la maison de la recherche d'Aix Marseille-Université. Sujet traité en partenariat avec le laboratoire LPS UR849, laboratoire de PSYCLE (EA3273) et le laboratoire de Mécanique et d'Acoustique (UMR 7031). « Intégrer l'approche des Facteurs Humains, qualitative et quantitative, peut-elle donner du sens au travail du contrôleur réalisant une approche quantitative et statistique de l'inspection non destructive ? »

majorité de la population du bureau d'études. Ainsi nos travaux de recherche regardent la pertinence et l'efficacité des outils de simulation à des fins d'analyse des Facteurs Humains. Je parle ici d'outils digitaux tels que la réalité virtuelle ou augmentée mais également des outils de simulation physique (Bernard et al. 2019). Ce diagnostic a permis, dans un environnement de bureau d'études où peu d'acteurs-métiers sont sensibilisés/formés aux Facteurs Humains, de créer une méthode permettant de choisir les bons outils de simulation pour réaliser des analyses Facteurs Humains « simples ». Cette démarche prend en compte les différentes situations de travail rencontrées en maintenance et les différents types d'outils de simulation. A la fin de cette démarche, un outil quantifiant quelques critères ergonomiques a été développé permettant ainsi d'apporter une forme d'autonomie aux non spécialistes. Les critères ergonomiques sélectionnés touchent davantage la dimension physique que les dimensions organisationnelles et cognitives. Cette démarche ne se substitue pas à l'ergonome qui garde un œil sur l'ensemble des analyses dites « externalisées » mais permet d'une part de traiter de nombreux sujets et d'autre part de sensibiliser l'ingénieur-concepteur aux sciences humaines. Ainsi, au-delà de la dimension industrielle, il existe une dimension pédagogique à ce travail.

Cependant, pour continuer à pousser et fiabiliser la prise en compte des Facteurs Humains en maintenabilité, il était nécessaire d'aller plus loin. Ainsi, grâce au contexte industriel et aux différents partenariats universitaires menés après la thèse de doctorat, plusieurs thématiques majeures ont été étudiées :

- Erreurs humaines ;
- Accidentologie ;
- Activités réelles des opérateurs de maintenance.

Également, la poursuite des enseignements à Aix-Marseille Université m'a permis de tester la pertinence des outils de simulation comme la réalité virtuelle pour améliorer le niveau d'apprentissage en maintenabilité aéronautique. Cet axe de recherche est important et a mis en évidence des résultats intéressants au travers d'un suivi des élèves sur deux années de scolarité. Le premier résultat montre que les étudiants qui utilisent la réalité virtuelle comprennent mieux et plus vite les enjeux de leur futur métier. Ce résultat induit que la mise en situation au travers de la réalité virtuelle, permet la mise en place de situations de travail rapidement, avec un haut niveau de réalisme et une facilité à répéter les exercices, et facilite l'acquisition de connaissances approfondies. Ces mises en situation permettent d'assurer à l'étudiant, d'une part, une meilleure connaissance des outils de réalité virtuelle qui se développent de manière exponentielle en entreprise, mais également de mieux maitriser les enjeux des Facteurs Humains pour les avoir pratiqués dans divers contextes simulés.

3.2 Motivations de l'HDR

Ma carrière est tournée vers l'industrie mais aussi la recherche que j'essaie constamment de valoriser au sein de chacun de mes projets industriels. Je reste en effet convaincu que la démarche de recherche est une réelle plus-value en milieu industriel pour gagner en rigueur technique et scientifique tout en consolidant davantage nos études. Et cela est d'autant plus important que les Facteurs Humains sont souvent vus comme une science que chacun connait, se basant sur la simple expérience de vie personnelle et le bon sens. La part de subjectivité est immense et décrédibilise souvent notre métier. Apporter de la rigueur, du quantitatif pour appuyer le qualitatif, proposer ou améliorer des protocoles expérimentaux permet de montrer le réel apport de notre métier qui se trouve à l'interface de bien

d'autres métiers, souvent non sensibilisés aux Facteurs Humains au sein des bureaux d'études. L'application des démarches ergonomiques et la valorisation de la sécurité ne peuvent se résumer en un objectif marketing ou de productivité mais bien en une démarche active avec des impacts majeurs, profonds et durables pour toutes et tous. Ainsi, depuis 7 ans, j'ai exploré de nombreuses pistes et thématiques de recherche comme évoqué dans la partie précédente. Cette HDR est d'abord l'occasion de structurer l'ensemble des travaux menés, de recentrer les nombreuses thématiques explorées pour gagner en efficacité dans les travaux futurs. C'est également l'occasion de désaxer mon point de vue en me posant de nouvelles questions, peut-être en étant davantage critique sur mon début de carrière.

De plus, la conduite de projets de recherche au sein d'Airbus, mais également au sein d'Aix-Marseille Université et de l'Université de Technologie de Belfort Montbéliard pourrait être accélérée avec l'obtention de cette habilitation, notamment en créant davantage de liens entre les mondes industriel et universitaire. Le pilotage de projets de recherche, la direction de thèses CIFRE ou encore la mise en place de collaborations durables sont un enjeu essentiel. La HDR donnera une légitimité plus forte pour conduire des projets de recherche autour des Facteurs Humains et de l'Ergonomie en industrie, au même niveau que de nombreux projets de recherche existants mais touchant exclusivement des domaines de l'ingénierie (acoustique, aérodynamique, dimensionnement des structures, vibrations etc). Il est essentiel d'accélérer la mise en place de projets pour favoriser la mixité entre exigences ergonomiques et critères mécaniques. La recherche regorge de méthodes et d'outils, mais combien sont réellement implémentés et exploités dans nos industries ? Il faut désormais s'atteler à transférer ces connaissances en industrie, pour en tester les résultats, déterminer leur niveau de performance et pour continuer à les améliorer. J'ai tendance à parler de recherche « pragmatique » qui est selon moi, le dernier jalon qui manque à beaucoup de travaux universitaires essentiels.

3.3 Intérêts scientifiques de cette HDR

Cette HDR tente d'apporter une vision holistique de l'ergonomie en maintenabilité et en maintenance dans le secteur aéronautique, et plus particulièrement dans l'industrie des hélicoptères. Les Facteurs Humains en conception, ou plus souvent appelés « Human Factors Engineering », restent une science encore peu répandue en maintenabilité. Même si de nombreux travaux scientifiques ont développé des démarches centrées utilisateurs, au travers même d'outils de simulation tels que les mannequins numériques ou les maquettes physiques, elles sont bien souvent menées avec un regard d'ingénieurs-concepteurs, mécanicien. Cette HDR insistera ainsi sur les moyens qui permettent d'aller au-delà de la simple croyance que la prise en compte des Facteurs Humains relève principalement de l'expérience personnelle et du bon sens. Il existe en effet des méthodes, des processus ou encore des outils qui doivent pouvoir être exploités pour prendre pleinement en compte les caractéristiques Humaines au cours des phases de conception dédiées à la maintenance. Également, au regard de la littérature actuelle et des travaux de recherche qui ont été menés ces dernières années, le transfert de connaissances vers les acteurs-métiers des bureaux d'études, à savoir des ingénieurs en conception et en mécanique, est essentiel. Je parle bien de transfert de certaines connaissances en ergonomie de conception pour aider les acteurs-métiers, mais je ne parle pas, en aucun cas, de substitution à l'ergonome. D'ailleurs, la présence d'ergonomes est un prérequis pour s'assurer de la mise en œuvre

des méthodes et outils associés et, parfois, reprendre les sujets pour en assurer la direction et le suivi, lorsque ces derniers deviennent complexes et relèvent de compétences propres à l'ergonome.

Cette HDR est aussi l'occasion de définir ce que l'on entend par Ergonomie et Facteurs Humains. Si la communauté scientifique a de plus en plus tendance à réunir les deux termes en synonymes, comme l' « International Association of Ergonomics » (IEA), et cela est appuyé aussi par de nombreux articles en revue (Karwowski, 2012 ; Lehto & Landry, 2012 ; Dul et al, 2012) parlant de HFE pour « Human Factors / Ergonomics » ou EFH pour « Ergonomie et Facteurs Humains », je propose d'apporter une nuance. Cette nuance vient des nombreux échanges avec des confrères mais surtout de ma pratique industrielle et de mon expérience globale. Je vais ainsi dans ce mémoire continuer à parler d'Ergonomie et de Facteurs Humains non pas comme des synonymes mais bien comme deux disciplines « cousines », et nécessairement complémentaires. Il convient donc de rappeler les définitions de l'Ergonomie et des Facteurs Humains, pour pouvoir étayer mon propos dans un deuxième temps. Il existe, dans les deux approches, de nombreuses définitions depuis plusieurs décennies. Je ne citerai ici que les deux définitions qui, selon moi, représentent le mieux chacune des disciplines.

- « *L'Ergonomie* est l'étude scientifique de la relation entre l'homme et ses moyens, méthodes et milieux de travail. Son objectif est d'élaborer, avec le concours des diverses disciplines scientifiques qui la composent, un corps de connaissances qui dans une perspective d'application, doit aboutir à une meilleure adaptation à l'homme des moyens technologiques de production, et des milieux de travail et de vie » (*IVe congrès international d'ergonomie de la Société d'Ergonomie de Langue Française (SELF), 1969).* Cette définition induit la nécessité d'observer l'Homme au travail pour en comprendre toutes les dimensions, touchant ainsi l'aspect sociale, socio-économique…et ne se focalisant pas uniquement sur l'environnement direct de travail. L'analyse est davantage macroscopique en tenant compte des relations entre individus, hiérarchies avec un regard pouvant même toucher l'environnement extérieur au lieu de travail.

- *Les Facteurs Humains*, quant à eux, aussi parfois définis au singulier car vus comme un domaine, trouvent plusieurs définitions dans la littérature. Je vais en proposer une venant du régulateur de l'aviation civile américaine (FAA pour « Federal Aviation Administration ») qui correspond à ce qui est attendu, en termes de pratique, au sein d'une industrie aéronautique comme celle dans laquelle je travaille : « Human Factors. Within the FAA, Human Factors entails a multidisciplinary effort to generate and compile information about human capabilities and limitations and apply that information to equipment, systems, facilities, procedures, jobs, environments, training, staffing, and personnel management for safe, comfortable, and effective human performance » ou en français « les Facteurs Humains impliquent un effort multidisciplinaire pour générer et compiler des informations sur les capacités et les limites humaines et appliquer ces informations à l'équipement, aux systèmes, aux installations, aux procédures, aux emplois, aux environnements, à la formation, à la dotation en personnel et à la gestion du personnel pour une performance humaine sûre, confortable et efficace. » Cette définition n'induit pas une analyse de l'activité mais davantage un suivi normatif sur les capacités de l'Homme au travail. D'ailleurs, au travers des Facteurs Humains nous entendons souvent

> les disciplines scientifiques telles que la physiologie, la neuropsychologie… comme des disciplines qui visent davantage à connaitre les caractéristiques humaines et les capacités associées plutôt que de comprendre pourquoi l'Homme agit d'une certaine manière dans un environnement donné.

Ces deux définitions, de l'ergonomie et des Facteurs Humains, ne font pas toujours appel aux mêmes ressources, méthodes et outils. Néanmoins, au regard de la pratique déployée au sein de certaines industries et notamment sur mon lieu de travail à Airbus, il apparaît une forme évidente de complémentarité qui m'a toujours imposée de jumeler les deux approches. D'abord, la mise en place de l'ergonomie francophone est indispensable car c'est elle qui impose la présence d'un ergonome sur le terrain, auprès des opérateurs, et pousse ainsi plus loin la question de la valeur du travail, de l'activité humaine. Cette approche est indispensable et permet une plus grande compréhension de la situation de travail en mettant à la lumière du jour l'opérateur et sa manière d'agir, les compromis ou stratégies opératoires, les ajustements et astuces que seul l'Homme met en place pour que la tâche devienne activité. Nous verrons dans la suite de nos chapitres qu'une des clés de l'ergonomie de conception est de mieux collaborer avec les ingénieurs-concepteurs – D'ailleurs, nous dissocierons les ingénieurs-concepteurs qui ne sont pas des spécialistes en EFH et les ergonomes qui sont présents en bureau d'études –. Les analyses ergonomiques, au travers de l'approche francophone, apportent souvent un éclairage fort sur la réalité du terrain mais trop souvent de manière qualitative. Convaincre un ingénieur-concepteur de modifier son design sur la base simple d'un constat, parfois subjectif, n'est pas réaliste. La nécessité de quantifier l'activité est vitale pour assurer le compromis entre critères mécaniques et exigences ergonomiques. C'est en ce sens que l'approche anglophone, au travers des Facteurs Humains, permet plus facilement de quantifier le travail, touchant aussi bien l'aspect physique, cognitif ou encore organisationnel. Cette approche anglophone a ainsi la vertu de venir consolider l'approche francophone. Selon moi, l'inverse n'est ainsi pas forcément vrai, et l'ordre des analyses est crucial en observant d'abord sur le terrain (avec pourquoi pas des appareils de mesures), puis en analysant les résultats avec l'aide des Facteurs Humains, beaucoup plus normatifs.

4. Conclusion et organisation du document

L'introduction de cette HDR au sein du chapitre I m'a permis de retracer mon parcours de recherche, d'enseignant et d'industriel. Cette partie a été aussi l'occasion de décrire mes motivations et l'intérêt scientifique de ce travail. Plus particulièrement, j'ai insisté sur la nécessité de créer davantage de liens entre l'industrie et la recherche, qui est aussi une clé pour rendre pragmatique, concret, tester et faire évoluer notre discipline mais aussi la sécurité au sens large en industrie. Dans notre cas, l'intégration de la discipline de l'Ergonomie et des Facteurs Humains (EFH) impacte la préservation de la santé, la sécurité des opérateurs de maintenance mais pas seulement. Eviter les erreurs humaines et assurer la sécurité des vols sont également une conséquence de cette intégration. L'impact des travaux menés est ainsi multiple. Dans les parties qui suivent, je détaillerai aussi l'ensemble des voies qui permettent cette prise en compte. Ainsi dans un chapitre II, nous verrons comment passer des phases de conception dans lesquelles la maintenance est imaginée (maintenabilité) à sa mise en œuvre et donc la réalisation même des activités de maintenance. J'appellerai cette orientation l'approche proactive. A l'inverse, le chapitre III traitera de l'orientation inverse, appelée approche rétroactive. Elle consiste à prendre les exigences EFH provenant des retours d'expérience des activités de maintenance vers les phases de conception, donc en maintenabilité. Nous verrons qu'il existe un fil conducteur aux chapitres II et III avec l'exploitation d'outils de simulation de l'activité communs aux deux approches proactives et rétroactives. Le chapitre IV sera dédié aux outils de simulation en aéronautique. La dernière partie de ce mémoire, le chapitre V, sera dédiée à la conclusion de nos propos mais également aux perspectives. Les perspectives sont centrales car elles apportent une réflexion critique sur ce qui a été acquis aux cours de nos travaux de recherche et sur le chemin qu'il reste à parcourir pour assurer une sécurité totale autour des activités de maintenance et de la sécurité aérienne. Quand je parle d'une sécurité totale, je parle de demain, où la probabilité qu'un opérateur se blesse, qu'une erreur de maintenance survienne, qu'un incident ou un accident survienne avec pour cause centrale une erreur de maintenance sera la plus faible possible.

CHAPITRE II

DE LA MAINTENABILITE VERS LA MAINTENANCE

(Approche proactive)

II. DE LA MAINTENABILITE VERS LA MAINTENANCE (approche proactive)

1. Introduction

Ce chapitre traitera de la maintenabilité, principe permettant la conception de la future maintenance et l'amélioration d'une maintenance existante, au travers de phases de conception. De manière générale, la conception se définit comme une « activité créatrice qui, partant des besoins exprimés et des connaissances existantes, aboutit à la définition d'un produit satisfaisant à ces besoins et industriellement réalisable » (AFNOR, 1988). La maintenabilité n'échappe pas à cette définition, et nous verrons qu'elle est d'autant plus complexe à maitriser que la maintenance aéronautique engage des enjeux de sécurité au sol comme en vol, des enjeux de performance et d'efficience. Dans ce chapitre, nous parlons de phase proactive, des processus de conception qui conduisent aux activités de maintenance. Nous nous situons donc au bureau d'études. Dans un premier temps, nous définirons ce qu'est la maintenabilité en détaillant les grands principes qui la composent. Nous développerons ensuite la discipline de l'ergonomie et les Facteurs Humains (EFH) en maintenabilité, c'est à dire comment ils se définissent dans cet environnement et comment ils sont pratiqués. Cette partie ayant déjà été longuement abordée dans les premiers travaux de recherche de la thèse de doctorat (Bernard, 2019), nous verrons une synthèse détaillée des éléments clés à retenir. Cette synthèse nous permettra d'aborder la suite des travaux de recherche avec une meilleure compréhension des choix qui ont été fait, notamment dans les orientations prises.

2. Principes de la maintenabilité

Dans les années 1970, le monde de l'industrie décide d'améliorer son rendement en termes de coût, de qualité et de fiabilité (Boothroyd & Alting, 1992). Cette amélioration est souhaitée au regard de la concurrence croissante et de la démultiplication des choix pour des produits similaires comme ceux de la grande distribution (produits ménagers, électroniques) mais également l'industrie lourde comme l'automobile. Il est alors développé une approche de conception entièrement pensée pour optimiser la production notamment au travers de l'assemblage des produits. Nous parlons alors, dans le terme anglophone, de « Design For Assembly » (DFA) dont le postulat est clair : plus le produit est facile à monter, plus il peut être fabriqué en grande quantité et à moindre coût. L'enjeu est clairement économique. Le principe se base sur l'analyse des interactions entre chaque pièce composant le produit pour ainsi améliorer leur conception à des fins d'assemblage. Mais, ce paradigme va rapidement se révéler limité, notamment aux vues de l'évolution de la société de consommation. Produire plus et mieux ne suffit pas. Les clients veulent désormais acheter des produits qui puissent être réparés. C'est pourquoi une nouvelle exigence est introduite dans les cahiers des charges dans les années 1990 : la capacité à désassembler un produit ou « Design For Disassembly » (DFD). 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. Cette donnée est même vue comme un nouveau besoin utilisateur. Il a donc fallu imaginer un produit dont l'assemblage devait être pensé pour la production de celui-ci mais également pour que le client puisse désassembler et

réassembler le produit lui-même. Cette approche est d'autant plus complexe qu'un produit doit être conçu pour, d'une part, un assemblage industriel avec une séquence et des outils spécifiques, et d'autre part, un assemblage par le client avec une séquence différente et des outils standards (Boothroyd & Alting, 1992). A cette époque, les industriels, et plus particulièrement l'industrie automobile, pensent même à volontairement « brider » la capacité des produits à être désassemblés et réassemblés par le client lui-même. Et le principe n'est pas nouveau, des méthodes ont déjà été déployées lors de la crise économique de 1930, ou plus communément appelée la Grande Dépression. Prenons l'exemple de General Motors aux Etats-Unis qui décide de booster le marché en proposant régulièrement de nouveaux modèles, de nouvelles options, suscitant ainsi de nouveaux besoins (Lombès & Poubeau, 2014). Cette stimulation de la relance, c'est-à-dire faire émaner un besoin, génère le principe de renouvellement. A cette époque le principe de société de consommation apparaît, entraînant avec lui la notion d'obsolescence programmée, d'ailleurs définie et théorisée par Bernard London en 1932 (Bernard, 1932, cité dans la revue du MAUSS en 2014). Ainsi, basé sur ces principes fondateurs de contrôle du besoin utilisateur, les ingénieurs-concepteurs vont tenter de maîtriser le niveau de la future maintenance entre ce qui peut être fait par le client lui-même et ce qui devra être fait par un professionnel. Par exemple, sur certains véhicules, changer un phare va devenir très complexe, long et laborieux, pour ne pas dire impossible par un automobiliste lambda. Ce dernier devra passer par la prestation d'un professionnel (Fourcade, 2005).

Par la suite, ces deux phases (DFA and DFD) n'ont jamais cessé d'être améliorées par les industriels de tous les domaines (transport, produits électroménagers etc…). Cette évolution a amené les industriels à développer la maintenabilité, que nous pouvons considérer comme une branche des sciences de l'ingénieur. Au sein du monde industriel, de nouveaux départements et de nouvelles compétences entièrement dédiés à la maintenabilité ont été créés. Une définition officielle de la maintenabilité a d'ailleurs été éditée : « la maintenabilité est une caractéristique d'un système mesuré par la probabilité d'être remis, par une action de maintenance, dans des conditions opérationnelles définies, dans une durée fixée, les ressources et les conditions d'environnement étant préalablement spécifiées » (Chapouille, 1987, p. 2). Egalement, Abdullah et al., 2007, au travers d'une étude sur la maintenabilité, ont qualifié les pièces composant un système mécanique en évaluant quantitativement leur facilité à être démontées. Cette étude permet de dégager deux notions particulièrement riches qui définissent d'une autre manière le domaine de la maintenabilité tout en introduisant la notion d'EFH :

- L'optimisation mécanique du système pendant les phases de conception du produit ou du système impacte l'activité de maintenance. Ainsi, plus les ingénieurs-concepteurs prennent en compte les contraintes mécaniques et les exigences ergonomiques, liées à l'activité de l'Homme lors des phases de montage/démontage, plus l'acte de maintenance sera anticipé et aisé.
- L'anticipation des gestes, des postures, des efforts permettant la maintenance et l'intégration de ce même produit ou système 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).

Plus globalement, nous trouvons une littérature riche qui détaille de nombreuses méthodes formalisant les études de maintenabilité à travers majoritairement des objectifs de réduction de coûts, de temps, de maintenance et de fréquence (Serghides & Fielding, 1987 ; Nottingham et al., 1997 ; Amundarain et al., 2002 ; Di Gironimo et al., 2004 ; Lee et al., 2007 ; Rui et al., 2009 ; Ding, 2009 ; Shi & Liu, 2012 ; Kruger–Nguyen, 2015). Certaines études 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). D'autres études présentent l'application de normes ergonomiques dédiées à la maintenabilité dans le domaine de l'aéronautique (ATA, 2000 ; ATSB, 1997 ; CAA, 2002). Certaines études, enfin, se concentrent sur des méthodes déployant des outils de conception afin de mieux définir et de mieux simuler des tâches de maintenance à des fins d'optimisation de la conception. Nous retrouvons principalement la Conception Assistée par Ordinateur (CAO), les mannequins numériques 3D reconfigurables et la réalité virtuelle (Amundarain et al., 2002 ; Di Gironimo et al., 2004 ; Rui et al., 2009 ; Shi & Liu, 2012 ; Kruger– Nguyen 2015).

Dans le cadre de cette dernière 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) :

- 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) ;
- 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 ;
- Définition et mise en œuvre de procédure : 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 tout en réduisant les coûts et, dans la mesure du possible, la pénibilité au travail.

Cette dernière approche, au regard de notre expérience industrielle et universitaire, semble être la plus pertinente pour définir la maintenabilité dans la conception de produits complexes et lourds, comme les aéronefs, les voitures ou encore les trains. Nous proposons ainsi une synthèse avec une priorisation temporelle :

1. Favoriser et optimiser l'architecture produit/système pour assurer une maintenance sûre, efficace et efficiente. Plus cette approche est réalisée tôt dans le processus de conception, plus elle peut être respectée ;
2. Si le point 1 ne peut être que partiellement respecté (ou non respecté), concevoir des outillages pour pallier au manque d'accessibilité pour assurer une maintenance sûre, efficace et efficiente ;
3. Les points 1 et/ou 2 doivent être accompagnés d'une ou plusieurs procédures de maintenance qui doivent être pensées dès la conception du produit/système.

A travers ces trois façons de faire, sachant qu'elles peuvent être complémentaires, la difficulté est de pouvoir conserver l'efficience mécanique et esthétique du produit tout en y intégrant des exigences EFH. Soulevons également 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. Cette approche relève évidement de l'approche classique en EFH mais peut-être moins évidente à mettre en place pendant les phases de conception où, potentiellement, l'activité future est mal perçue ou mal anticipée.

3. Historique de l'ergonomie et des Facteurs Humains en maintenabilité

3.1. Approches générales

L'intégration de l'EFH dans le processus de conception de la maintenabilité, semble être une solution pour mieux concevoir les tâches, les produits, les environnements, … pour les futurs opérateurs. Ce point de vue est bien défendu et décrit dans de nombreux travaux (Duchamp et al., 1999 ; Garrigou et al., 2001 ; Sagot et al., 2003 ; Chitescu et al., 2003 ; Falzon, 2004 ; Chitescu, 2005 ; Mahdjoub, 2007 ; Mahdjoub et al., 2008 ; Guerlesquin, 2012). En effet, les composantes de l'EFH – que ce soit la composante physique, cognitive et organisationnelle, telles que définies par l'Association Internationale de l'Ergonomie (IEA, 2000)– sont pertinentes 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 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 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 de l'EFH 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, l'EFH 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 à l'EFH 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 et notre expérience industrielle, 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 (Lee et al., 2008) (noté 1 sur la Figure 3). Le cycle de vie du produit 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 EFH 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 cycle de vie du produit, 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 cycle de vie du produit, 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 deuxième approche se centre sur les analyses de maintenabilité intégrant une approche EFH au sein du département de la maintenabilité (noté 2 sur la Figure 3) qui doivent 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). Ainsi, chaque département (rotor, intégration électrique, train d'atterrissage…) 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, les méthodes déployées 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 de l'EFH 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'EFH comme le montre une grande partie de nos travaux (Bernard et al., 2019 ; Bernard, 2019).

- La troisième et dernière approche concerne les approches ponctuelles de l'EFH réalisées dans les départements composant le bureau d'études (par exemple, hydraulique et architecture), qui tentent d'intégrer l'EFH 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 3). 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 l'EFH n'est que très rarement intégrée 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 Assistée par Ordinateur (CAO), voire encore la réalité virtuelle (RV) pour justement mieux prendre en compte l'EFH tout au long du processus de conception en l'articulant encore mieux avec les critères plus techniques, mécaniques,…. bien maîtrisés dans un bureau d'études (Sagot et al. 2003 ; Mahdjoub et al. 2013). Cependant, soulevons que l'usage de ces outils, déjà connus et utilisés en bureau d'études, nécessite aussi un savoir et un savoir-faire particuliers pour être réellement exploités à des fins d'analyses et d'études EFH (Broberg, 2007 ; Kaljun & Dolšak, 2012).

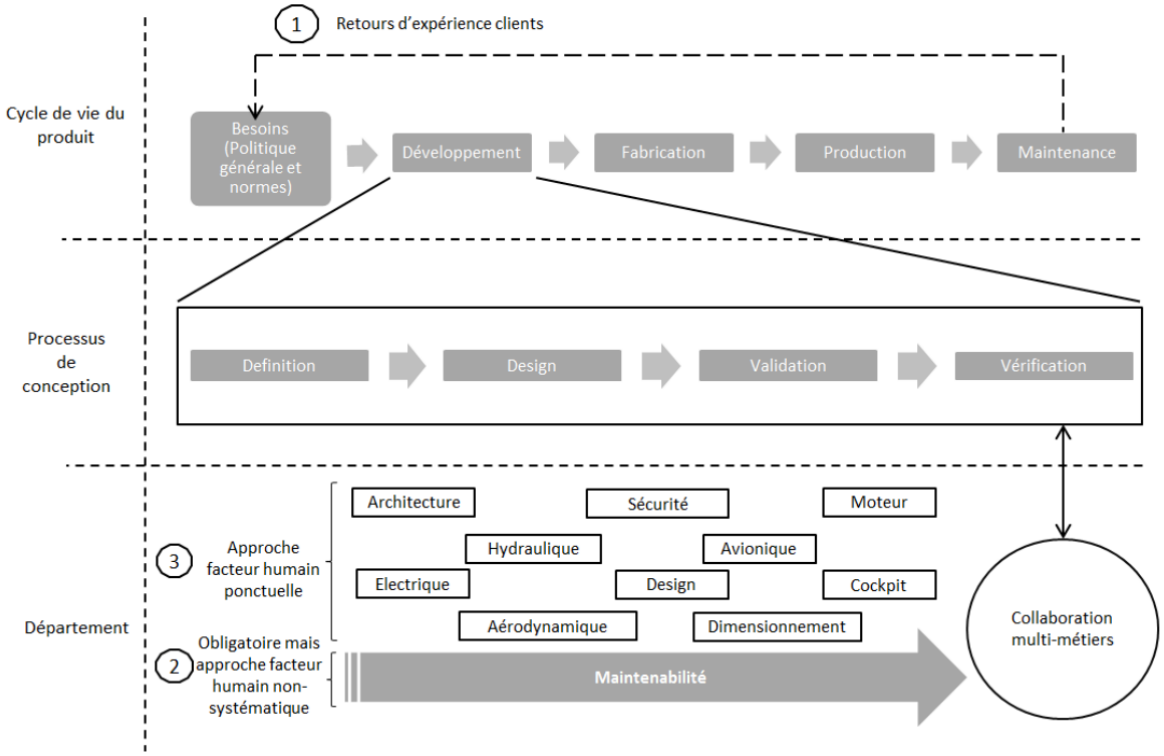


Figure 3: Représentation des trois voies principales pour intégrer l'EFL (Ergonomie et Facteurs Humains) dans le processus de conception en maintenabilité.

3.2. Stratégies et outils historiques pour déployer l'ergonomie et les Facteurs Humains en maintenabilité

Aujourd'hui, pour anticiper l'activité de maintenance, un bureau d'études maintenabilité, utilise des indicateurs spécifiques. 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 la 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 du produit ou système associé pour qu'il puisse remplir les fonctions pour lesquelles il a été conçu (Glade, et al., 2005). Nos travaux passés (Bernard et al., 2019) ont ainsi montré que l'ensemble des indicateurs de maintenance se classent selon trois catégories économiques, techniques et organisationnelles selon la norme européenne EN 15341 (AFNOR, 2017), intitulée « Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance ». 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.

Il est important de rappeler que la maintenabilité demeure, aujourd'hui encore, une activité assez nouvelle. Même si, comme nous l'avons précédemment écrit, les prémisses de la maintenabilité apparaissent dans les années 1970, elle est encore aujourd'hui en pleine croissance. En effet la maintenabilité utilise encore des indicateurs objectifs de la maintenance notamment pour évaluer les coûts, les temps ou encore la fiabilité des systèmes afin d'en planifier les échéances de maintenance (Harry & Kinnison, 2004). La non dissociation entre les indicateurs de maintenance (de rentabilité/performance relevant de phases opérationnelles) et les indicateurs de maintenabilité (dédiés aux phases de conception) entraîne un déséquilibre dans l'ensemble du cycle de vie du produit/système. Ce degré « d'objectivité » des indicateurs de maintenance, s'appuyant sur des métiers relevant eux-mêmes des Sciences Pour l'Ingénieur (SPI), contraste quelque peu avec l'approche EFH qui peut être conduite en maintenabilité par des non spécialistes en EFH, qui relève plus des Sciences Humaines et Sociales (SHS). Or, l'EFH exploite aussi des indicateurs objectifs maîtrisés par des ergonomes, aujourd'hui encore trop peu nombreux en bureau d'études pour tenter d'assurer cette mixité entre SHS et SPI. 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 opérateurs, encore souvent dissociés. Ce rapprochement de disciplines, de métiers, avec les modes de raisonnement associés peut jouer un rôle majeur en maintenabilité. Ainsi, comment peut-on faire travailler ensemble, des personnes, issues de formations différentes ? Comment quantifier une activité de maintenance en termes de risque, 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. Ainsi, pour améliorer l'articulation entre les critères mécaniques et EFH lors des analyses menées en maintenabilité, et donc cette collaboration souhaitée entre les différents métiers participant à un même projet, plusieurs travaux existent. Nous pouvons citer ceux de Moreu De Leon et al., 2012, ou encore de Van Horenbeek et al., 2013 qui développent une démarche qualitative puis quantitative traduisant une articulation déjà possible entre les deux approches citées. Par exemple, la démarche de Moreu De Leon, se base sur des indicateurs EFH couramment utilisés dans la littérature (l'accessibilité, le séquencement 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). De plus, nous remarquons que ces travaux ne se focalisent que sur la dimension physique de l'EFH, incluant ponctuellement la dimension organisationnelle. Mais ces évaluations restent superficielles et ne rentrent pas dans un niveau de détail requis par les disciplines de l'EFH. Nous pouvons l'expliquer par le fait que la plupart des auteurs de ces analyses et démarches viennent majoritairement du monde des SPI et non des SHS.

Sur la base de ce constat, nous proposons dans la suite de ce mémoire de résumer les travaux menés lors de deux de thèses de doctorat CIFRE au sein d'un département du bureau d'études maintenabilité.

4. Nouvelles approches pour mieux intégrer l'EFH en maintenabilité

Deux thèses CIFRE se sont succédées entre 2016 et 2022 (Bernard, 2019, Murie, 2022). Ces deux thèses sont complémentaires et ont pour objectif premier d'améliorer et de fiabiliser l'intégration de l'EFH dans le département maintenabilité d'Airbus Helicopters. Les sections qui suivent visent à détailler les principaux résultats de ces deux recherches et leur complémentarité. En outre, la première recherche s'est focalisée sur la prise en compte de la santé et de la sécurité des opérateurs pendant les phases de conception, notamment sur la prise en compte de ces critères au travers des outils de simulation digitaux et physiques. La deuxième thèse s'est, quant à elle, attardée sur la notion d'erreurs en maintenance. La Figure 4 schématise la temporalité des deux sujets de recherche :

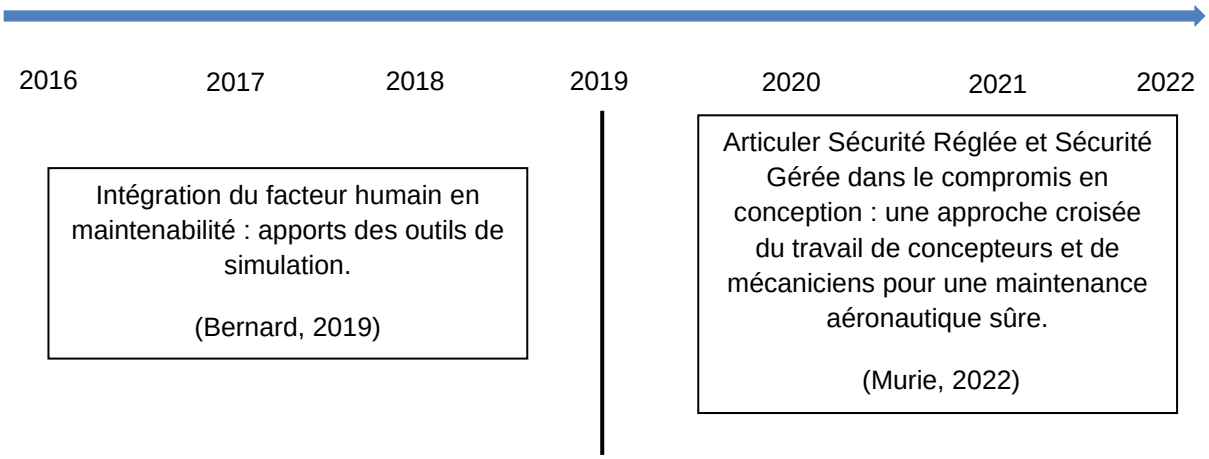


Figure 4: Schématisation de la temporalité des deux thèses de doctorat CIFRE menées au sein du département maintenabilité d'Airbus Helicopters.

4.1. Anticiper pour préserver la santé et la sécurité des opérateurs de maintenance

La thèse de doctorat conduite entre 2016 et 2019 nous a amenés à faire un diagnostic précis, appuyant ce que nous avons décrit dans la partie précédente (partie 1 du chapitre II). Il en résulte le développement d'une démarche dédiée au département maintenabilité ayant pour objectif que l'EFH soit mieux prise en compte par les non spécialistes en EFH, représentant la plus grande majorité de la population d'un bureau d'études.

4.1.1. Contexte industriel

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 Reason (1993) et de Mazeau (1993), dont le titre de l'ouvrage est évocateur « l'Homme est un agent de fiabilité faillible », signifiant 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 prendre des risques pour sa santé et sa sécurité, et celles des autres. Ainsi, une meilleure prise en compte de l'EFH en maintenabilité pourrait permettre de mieux anticiper les futures tâches de maintenance et donc l'activité des opérateurs qui en découle (Bernard et al., 2020). 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 numérique et physique 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 l'EFH, notamment à travers la composante physique, 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. Dans le secteur des hélicoptères, il n'existe aucune recommandation officielle, mais cette industrie anticipe un potentiel futur changement et considère l'intégration de l'EFH 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 l'EFH dans ses études de maintenabilité comme elle l'entend et surtout, comme elle peut en fonction de ses moyens, de ses compétences et de ses contraintes.

La problématique étudiée dans cette première thèse, au sein d'un constructeur d'hélicoptères, a tenté d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

« Comment mieux prendre en compte l'EFH dans les phases de développement et de conception en maintenabilité, là où les acteurs-métiers ne sont ni formés, ni initiés à l'EFH ? »

4.1.2. Méthodes pour répondre à la problématique de recherche

Pour répondre à cette problématique, notre démarche et nos objectifs de travail se sont articulés autour de quatre contributions majeures: (1) étudier et comprendre comment l'EFH 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 EFH ; (3) développer une démarche favorisant l'intégration de l'EFH en maintenabilité par des non experts en EFH dont le modèle conceptuel est détaillé en Figure 5 ; (4) valider la démarche au sein 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 de l'EFH en maintenabilité aéronautique.

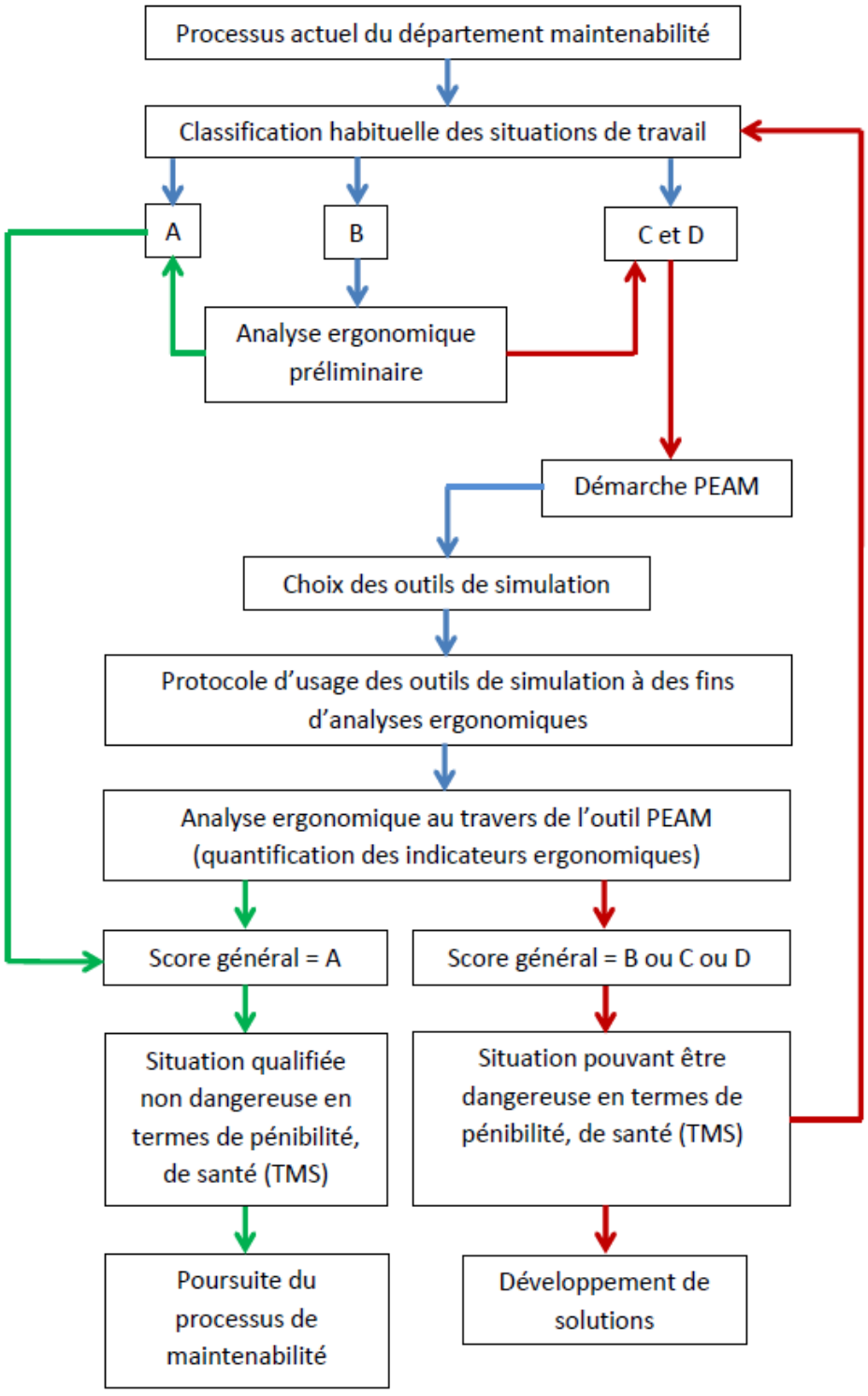


Figure 5: Modèle conceptuel de la démarche d'analyse ergonomique PEAM (Bernard, 2019 ; Bernard 2023). Les scores A, B, C et D sont les scores couramment utilisés pour identifier les risques pour l'opérateur et pour l'intégrité de l'hélicoptère (A signifiant aucun risque, D signifiant une très forte probabilité de blessure et/ou d'impact sur l'architecture de l'hélicoptère).

4.1.3. Résultats majeurs

Quatre contributions majeures sont à mentionner.

(1) L'acteur-métier en maintenabilité n'est pas formé à l'EFH mais a la volonté de le prendre en compte, très souvent au travers de normes ou standards centrés sur la dimension physique. Ainsi, l'EFH est intégrée de manière très hétérogène sur l'ensemble du processus de conception, sans méthodologie définie et validée. Or, des outils de simulation déjà utilisés à des fins d'analyses mécaniques et d'architectures pourraient être utilisés pour réaliser des analyses de l'EFH et favoriser le compromis entre critères techniques et exigences EFH (Bernard et al., 2019).

(2) 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 EFH pour la majorité des indicateurs dédiés et sur l'ensemble des composantes physiques, cognitives et organisationnelles. Le mannequin numérique présente quant à lui des différences significatives pour certains indicateurs expliquées notamment par le manque de connaissances en biomécanique des acteurs-métiers en maintenabilité (Bernard et al., 2019).

(3) Une démarche a été développée, appelée PEAM (« Preliminary Ergonomics analysis in Maintainability », en français « Analyse ergonomique préliminaire en maintenabilité »), intégrée au processus de conception déjà existant pour assurer une acceptation et une acceptabilité de la démarche. Elle permet de sélectionner les bons outils de simulation en fonction de l'étape du processus de conception, de la zone de travail étudiée, de fournir des protocoles pour bien exploiter les outils de simulation ainsi que des indicateurs EFH simples à quantifier. Cette démarche ne se substitue pas à l'expertise d'un spécialiste en EFH (Bernard et al., 2023).

(4) La nouvelle démarche PEAM permet de mieux intégrer l'EFH en maintenabilité par des non experts en EFH. Les outils de simulation sont exploités de manière plus pertinente, les indicateurs EFH utilisés sont plus nombreux. Il apparaît cependant qu'une meilleure formation de cette nouvelle démarche aurait permis d'homogénéiser son usage sur l'ensemble des étapes du processus de conception (Bernard et al., 2023).

Sur la base de nos résultats issus de nos travaux de recherche entre 2016 et 2019, nos quatre contributions majeures 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 l'EFH 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. Également, des indicateurs EFH relevant des différentes composantes de l'EFH peuvent être évalués, par des non experts en EFH, 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 certains critères EFH par des non spécialistes en maintenabilité. Les approches de l'EFH peuvent ainsi être réalisées de manière plus rigoureuse, avec le support

d'ergonomes, au travers d'outils de simulation mieux exploités. Nous constatons dès lors que davantage d'indicateurs EFH sont observés et évalués.

4.2. Anticiper pour éviter les erreurs humaines

Lors de la première thèse décrite précédemment, nos travaux de recherche se sont focalisés principalement sur les risques liés à la santé et la sécurité de l'opérateur de maintenance et à la façon de mieux les étudier en phase de conception d'un produit, notamment par des non-spécialistes en EFH, bien que supportés par des ergonomes. Cependant, dans notre contexte industriel, l'évaluation de la santé et de la sécurité de l'opérateur de maintenance ne semble pas suffisante pour anticiper tous les risques et ainsi mieux concevoir. L'expérience du département maintenabilité montre que les erreurs humaines sont une source non négligeable d'évènements pouvant même parfois impacter la sécurité des vols.

Dans ce cadre industriel, nous avons lancé une nouvelle thèse en 2019 se focalisant donc davantage sur la compréhension des erreurs humaines en maintenance (Murie, 2022).

4.2.1. Contexte industriel

Cette demande industrielle autour de la réduction du risque d'erreurs humaines lors des activités de maintenance est inscrite dans le cadre bien connu et classique de la sécurité. Les travaux de Hollnagel et al. (2015) considèrent d'ailleurs que la sécurité peut se définir comme l'absence de risque ayant conduit le secteur aéronautique comme « ultra-sûr ». Le champ de l'EFH questionne la notion de sécurité depuis plusieurs années en ayant développé les concepts de sécurité en action et de sécurité réglée et gérée (Morel et al., 2008 ; de Terssac & Gaillard, 2009). Les travaux de recherche menés au travers de cette thèse se focalisent tout particulièrement sur l'articulation entre la sécurité réglée et gérée en interrogeant, de façon croisée, l'activité de concepteur en maintenabilité et celle d'opérateurs de maintenance. Pour assurer la sécurité aérienne, les ingénieurs-concepteurs et les opérateurs de maintenance font face à des situations de conflits de contraintes, appelés Situations à Enjeux de Sécurité. Ces travaux posent la problématique suivante : comprendre les modalités de gestion de ces conflits de contraintes à travers le prisme de la construction de compromis micro et macro-centrés (Amalberti, 2013). La Figure 6 résume la thèse défendue, avec deux silos entre les ingénieurs-concepteurs de la maintenance et les opérateurs de maintenance. Chaque partie prenante fait face à des contraintes et doit faire des choix, des compromis pour assurer les objectifs de performance et de qualité donnés par l'organisation.

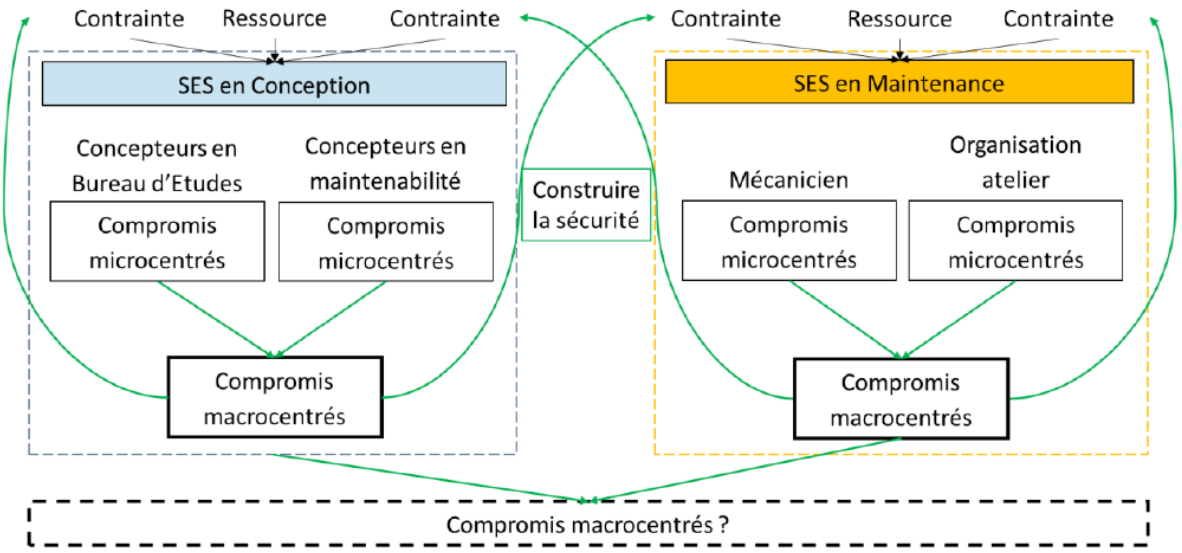


Figure 6: Modélisation de la thèse défendue autour de l'étude des Situations à Enjeux de Sécurité ou « SES » – Construction de la sécurité (Murie, 2022).

4.2.2. Méthodes pour répondre à la problématique de recherche

Pour répondre à la problématique, la thèse de Camille Murie se divise en plusieurs contributions : (1) comprendre et étudier le travail des ingénieurs-concepteurs en maintenabilité de l'entreprise accueillant la recherche ; (2) comprendre et étudier le travail des opérateurs de maintenance ; (3) comprendre les contraintes limitant l'organisation d'une conception participative favorisant l'articulation de la Sécurité Réglée et de la Sécurité Gérée dans une organisation ultra-sûre.

Les deux premières contributions déploient une même méthodologie pour l'identification et l'analyse des Situations à Enjeux de Sécurité des ingénieurs-concepteurs en maintenabilité et des opérateurs de maintenance. Cette analyse permet de poser un diagnostic concernant la manière dont les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité conçoivent la sécurité afin que les opérateurs agissent dans un environnement sûr. Ensuite, la troisième contribution se base sur ces diagnostics pour concevoir un dispositif de conception participative réunissant ingénieurs-concepteurs en maintenabilité et opérateurs de maintenance, la « démarche CSR » pour « Contraintes Stratégie Ressources ». Cette démarche vise à faciliter l'échange entre les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité et les opérateurs autour du travail réel de maintenance. Elle doit ainsi permettre à l'ingénieur-concepteur de définir des exigences de conception de la maintenance qui permettent aux opérateurs d'agir en sécurité face à des situations de travail variables. La démarche CSR produit dans un premier temps une banque de Situations à Enjeu de Sécurité en lien avec la question de conception posée. Plus particulièrement, la démarche CSR a été développée pour être appliquée suivant deux contextes différents : (1) modification de design ou de procédure de maintenance pendant les phases de conception d'un nouveau produit/système ; (2) analyse d'un évènement (incident) par retour d'expérience de l'opérateur impliqué dans l'évènement. Par l'analyse de ces événements significatifs, la démarche CSR vise à fournir des données sur :

- Les contraintes que doivent gérer les opérateurs de maintenance pour réaliser la tâche de maintenance ;
- Les stratégies mises en œuvre par les opérateurs pour agir en sécurité face à ces contraintes ;
- Les ressources nécessaires pour réaliser ces stratégies.

Ces données sont ensuite utilisées pour identifier des exigences de conception. Cette démarche CSR, comme pour la démarche PEAM centrée sur la santé et la sécurité de l'opérateur, peut avoir comme support des outils de simulation (réalité virtuelle ou maquette physique). Dans un cadre industriel où la disponibilité des dispositifs de simulation peut être complexe, la démarche CSR propose de pouvoir aussi réunir ingénieurs-concepteurs et opérateurs autour d'une table avec des supports comme des plans, des photos ou encore des modélisations 3D.

4.2.3. Résultats majeurs

Les Situations à Enjeux de Sécurité sont identifiées à travers les situations de travail des ingénieurs-concepteurs en maintenabilité et des opérateurs de maintenance. Les résultats montrent que les modèles de sécurité mobilisés par les ingénieurs-concepteurs et les opérateurs, pour concevoir et agir en sécurité, entrent en conflit. D'une part, les ingénieurs-concepteurs cherchent à construire des compromis micro-centrés (ex. contraintes du travail des opérateurs à intégrer dans la conception) et macro-centrés (ex. ajustement aux contraintes des autres acteurs de la conception) pour concevoir des solutions (ex. modification de design, des procédures de maintenance) qui permettent aux opérateurs d'appliquer les procédures « de façon sécurisée », c'est-à-dire en se conformant à la procédure. Les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité cherchent donc à supprimer l'écart entre la sécurité réglée et gérée, cet écart étant jugé à risque. D'autre part, agir en sécurité pour les opérateurs revient à opérer des compromis micro-centrés entre respect strict des procédures et préservation d'une relation de service de qualité auprès des compagnies aériennes ou opérateurs de vol : les opérateurs sont amenés à adapter les procédures pour assurer, en sécurité, le service de maintenance en respectant les contraintes imposées par les clients (souvent la contrainte de temps), ce qui implique un écart aux procédures.

Ce constat a permis de proposer une démarche de conception participative d'une maintenance sûre – la démarche Contraintes/Stratégies/Ressources (CSR) – soutenant le dialogue entre ingénieurs-concepteurs et opérateurs pour l'articulation entre la sécurité réglée et la sécurité gérée (Cuvelier et Woods, 2019). Cette démarche et les premiers résultats de son usage en conception de la maintenance ont permis d'identifier des contraintes organisationnelles (ex. l'imprévisibilité de la maintenance) limitant la mise en place d'une telle démarche au sein d'une organisation de bureau d'études ultra-sûre et ultra-réglée.

La section qui suit vise à discuter de l'articulation possible entre les deux démarches, développées au sein d'un même service d'un bureau d'études aéronautiques et émanant d'un diagnostic commun : les ingénieurs-concepteurs ont la volonté d'intégrer les critères EFH mais n'ont pas les connaissances ni les outils pour faire face aux compromis avec les critères mécaniques.

4.3. Discussion générale couvrant les deux thèses entre 2016 et 2022

4.3.1. Diagnostic global

4.3.1.1. Le niveau de connaissance en EFH

Les travaux menés sur la période de 2016 à 2022 ont montré qu'il y a bien une volonté d'intégrer l'EFH au processus de conception en maintenabilité mais qu'elle se limite bien souvent à la composante physique de l'EFH (Bernard et al., 2019 ; Murie, 2022). Dès lors, les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité 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 les composantes physiques, cognitives et organisationnelles. 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 l'EFH 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 EFH est souvent réduite à une faible quantité d'indicateurs relevant justement de l'EFH, quasi exclusivement centrée sur la dimension physique (accessibilité physique, collision avec l'environnement etc). 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'EFH, 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'EFH à partir d'outils de simulation sans se préoccuper des autres composantes pourtant indispensables pour bien intégrer l'EFH dans le processus de conception. Ce constat industriel va à l'encontre du constat bibliographique fait au travers de nos premiers travaux (Bernard, 2022), montrant qu'une trentaine d'indicateurs devraient pouvoir être pris en compte pour les trois composantes citées de l'EFH. De plus, nos travaux ont montré que le degré d'intégration de l'EFH, sur l'ensemble du processus de conception en maintenabilité, se faisait dans un certain désordre, voire une certaine confusion, traduisant peu de rigueur, peu de méthodes et/ou méthodologies définies. Les travaux de Garrigou et al. (2011) confirment également ce manque de prise en compte de l'EFH dans les processus de conception, expliquant même que cela constitue selon ses propos une « remorque » de la technique. 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. Également, pour supporter les analyses de maintenabilité et intégrer a minima l'EFH, 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 l'EFH en phase de conception. Cette approche, chez notre industriel aéronautique, reste néanmoins très ponctuelle, sans méthodologie réellement définie et surtout sans l'implication d'opérateurs réels, au regard des observations et diagnostics initiaux réalisés avant 2018

et l'implémentation de la démarche PEAM. 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 EFH des acteurs-métiers des bureaux d'études (Geng et al., 2013).

4.3.1.2. L'usage des outils de simulation

Les outils de simulation étant communs entre les ingénieurs-concepteurs et les ergonomes, nos premiers travaux de 2016 à 2019 se sont attachés à les étudier dans le contexte de la maintenance. En effet, 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 EFH 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 EFH, devenue indispensable. 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'EFH n'est pas significative (Bernard et al., 2019). 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). 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 pour mieux synchroniser monde physique et monde virtuel. Néanmoins, certains indicateurs ont montré des différences significatives comme le temps d'exécution des tâches de maintenance à cause de perte de repères dans l'espace (Loomis & Philbeck, 2008) ou encore l'apparition de cinétose (Chen et al., 2017). Le mannequin numérique, quant à lui, manque de précision à cause de la non observation d'un opérateur réel et de la subjectivité de l'étude, entre autres car ce type d'étude est généralement réalisé sans se préoccuper des autres tâches dans le même environnement de travail (Regazzoni & Rizzi, 2014). Nous proposons alors un nouveau paradigme pour les études de l'EFH 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. 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.

4.3.2. Voies d'amélioration pour mieux intégrer l'EFH en maintenabilité

Sur la base du diagnostic évoqué précédemment, nous avons pu développer deux démarches favorisant l'intégration de l'EFH en maintenabilité dédiées aux non experts en EFH. L'objectif est donc de proposer une démarche pour mieux intégrer l'EFH lors des analyses de maintenabilité avec le

support des outils de simulation déjà connus et maîtrisés par les acteur-métiers du département maintenabilité. Une première 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 EFH. Pour résumer, PEAM vise à :

- Faciliter le déploiement d'une approche permettant de mieux intégrer l'EFH 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 de l'EFH ;
- Choisir et évaluer les indicateurs EFH les plus appropriés en fonction de la situation de travail étudiée.

La démarche PEAM a été testée avant d'être déployée de manière systématique dans le département maintenabilité. Le protocole déployé pour vérifier la plus-value de PEAM montre plusieurs points clés (Bernard et al., 2023) :

- Le meilleur outil de simulation est utilisé à chaque étape du processus de conception conformément au protocole de la démarche PEAM ;
- Un seul outil de simulation est désormais utilisé pour chaque analyse EFH ;
- Le nombre d'indicateurs EFH utilisé est plus élevé ;
- Le pourcentage d'utilisation des indicateurs EFH est également plus élevé.

Néanmoins, la démarche PEAM se focalise principalement dans l'évaluation de la santé et de la sécurité des opérateurs à des fins d'améliorations du design. La notion d'erreurs humaines a été plutôt étudiée lors des travaux de recherche menés de 2019 à 2022 (Murie, 2022). La démarche CSR propose ainsi, par la voie d'une approche collaborative entre ingénieurs-concepteurs et opérateurs de maintenance, de mieux comprendre les erreurs humaines ayant eu lieu lors de la réalisation de tâches de maintenance pour apporter des solutions aux ingénieurs-concepteurs et ainsi, les éviter lorsque le produit sera conçu. Contrairement à PEAM qui a pour vocation à être utilisée par tous les non spécialistes en EFH de la maintenabilité – sans pour autant se substituer à l'expertise d'un ergonome – la démarche CSR doit être conduite par un ergonome, notamment pour dépouiller et interpréter les résultats. Cette démarche CSR cherche à améliorer le dialogue entre ingénieurs-concepteurs et opérateurs pour l'articulation entre la sécurité réglée et la sécurité gérée (Cuvelier et Woods, 2019). Néanmoins, si les premiers usages en 2022 montrent bien une mise en discussion de la sécurité gérée pour concevoir la sécurité réglée, ces discussions ne visent qu'une articulation cherchant à réduire l'écart entre sécurité réglée et gérée, cet écart étant toujours considéré comme un risque. L'auteur explique notamment que cette recherche perpétuelle de réduction d'écart entre sécurité réglée et gérée pour assurer une généralisation de la conformité de procédures, peut conduire à l'effet inverse. L'itération répétée de cette recherche de conformité ne peut tenir compte de l'imprédictibilité des situations de travail et peut mener à la création d'un nombre de procédures plus important (Nathanael et al., 2016).

Or, selon Barcellini et al. (2015) les démarches de conception participatives, soutenues par des simulations issues du travail réel permettent le dialogue entre les ingénieurs-concepteurs et les opérateurs et l'élaboration de solutions négociées. Nous pouvons dès lors supposer que la démarche CSR, aujourd'hui déployée pour dialoguer autour d'une table, pourrait avoir un tout autre impact si elle était exploitée au travers des outils de simulation, tel que nous avons pu le voir avec l'exploitation de la démarche PEAM. La problématique ainsi posée à l'issue de la période s'étalant de 2016 et 2022 est :

Comment peut-on jumeler la démarche PEAM avec la démarche CSR pour fiabiliser encore plus l'intégration de l'EFH au sein du bureau d'études maintenabilité, notamment en préservant systémiquement la santé et la sécurité des futurs opérateurs tout en réduisant drastiquement le risque d'erreur humaine.

Deux voies d'amélioration peuvent-être évoquées ici et seront détaillées en chapitre V :

- Jumeler la démarche PEAM et CSR en l'adaptant pour des non spécialistes en EFH ;
- Jumeler la démarche PEAM et CSR en la rendant efficace et efficiente quel que soit l'outil de simulation utilisé.

5. Conclusion

Dans ce chapitre II et les différentes parties qui le composent nous avons pu observer, grâce notamment à la conduite de deux thèses CIFRE entre 2016 et 2022, dans un contexte de l'industrie aéronautique, que les acteurs-métiers en maintenabilité essayaient d'intégrer l'EFH en se basant essentiellement sur la composante physique de l'EFH, voire organisationnelle et non cognitive. Ce contexte de bureau d'études, composé de spécialistes en conception mécanique, a permis de comprendre pourquoi le compromis entre les exigences EFH et les critères mécaniques n'était pas optimal. Nous avons soulevé plusieurs causes possibles :

- Il n'y a pas d'experts en EFH au sein de la maintenabilité ;
- L'acteur-métier en maintenabilité a la volonté de prendre en compte l'EFH mais n'a ni formation, ni connaissances dédiées ;
- L'acteur-métier prend en compte l'EFH principalement en s'appuyant sur quelques normes et/ou standards de l'EFH ;
- Les analyses en EFH sont réduites à une faible quantité d'indicateurs relevant de la composante physique de l'EFH (anthropométrie, accessibilité, gestes et postures, efforts, …) ;
- La notion d'erreur humaine n'est que trop rarement comprise, évaluée et prise en compte à des fins de mieux concevoir ;
- Les analyses en EFH sont conduites sans réelle rigueur, s'appuyant sur aucune méthodologie clairement définie et validée ;
- L'EFH est intégrée 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 de l'EFH ;

- La collaboration entre acteurs-métiers du bureau d'études (ingénieurs-concepteurs) et opérateurs de maintenance est rare.

Cependant, cette première approche consistant à analyser l'intégration de l'EFH en maintenabilité afin de mieux concevoir l'activité de maintenance future n'est peut-être pas suffisante pour anticiper toute la variabilité que représente l'activité de maintenance. D'ailleurs, nous avons vu au travers de la partie 1.1. de ce chapitre et plus particulièrement de la Figure 3 qu'il existe trois voies principales pour intégrer l'EFH dans le processus de conception en maintenabilité. Or, les travaux menés au travers de la thèse de doctorat entre 2016 et 2019 ne se sont concentrés que sur la voie 2 comme représenté en rouge sur la Figure 7. Les travaux réalisés entre 2019 et 2022, avec la proposition de la démarche CSR (Contraintes Stratégie Ressources), propose, dans une certaine mesure, d'étudier le retour d'expérience des clients autour d'évènements, correspondant à la voie 1 (retours d'expérience clients) en orange dans la Figure 7. La voie 1 sera développée en détail dans le chapitre III. La voie 1, même si elle a été abordée au travers de la thèse de doctorat de Camille Murie, a surtout consisté à optimiser la prise en compte de l'EFH dans les phases de conception et donc de consolider la phase proactive. La voie 2, définissant la prise en compte ponctuelle des EFH par d'autres départements ne fera pas l'objet d'analyse dans ce mémoire. L'optimisation des voies 1 et 3 permettra très probablement d'augmenter la prise en compte des EFH en maintenabilité et de réduire ainsi la volonté des autres départements du bureau d'études à faire, ponctuellement, eux-mêmes certaines analyses. Le chapitre qui suit vise à mieux comprendre pourquoi il est essentiel de poursuivre la compréhension de la pénibilité des opérateurs de maintenance pour, de manière beaucoup plus détaillée, faire descendre objectivement les retours d'expérience vers les bureaux d'études. Cette approche n'implique pas seulement l'analyse d'évènements (accidents, incidents) mais la compréhension, à travers des études dédiées, de la vie quotidienne d'un opérateur de maintenance.

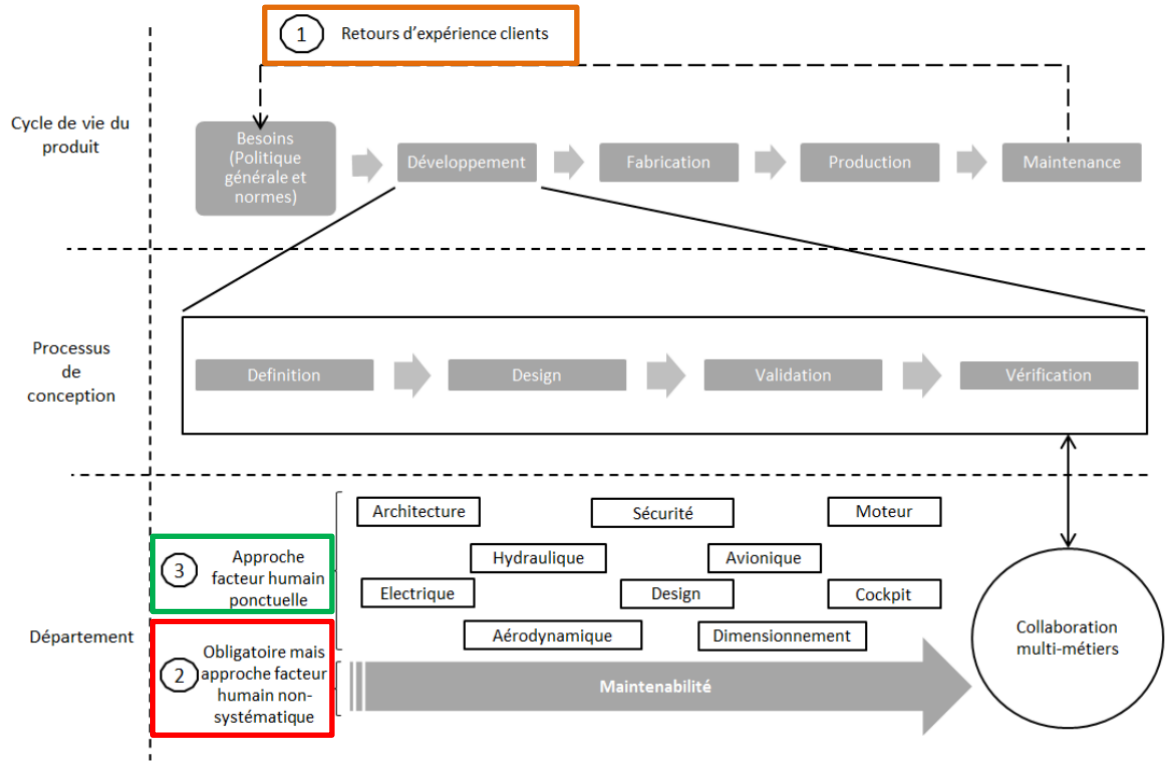


Figure 7: Représentation des trois voies principales pour intégrer l'EFH (Ergonomie et Facteurs Humains) dans le processus de conception en maintenabilité. La voie 2 (rouge) ayant été étudiée entre 2016 et 2019, la voie 1 ayant été explorée entre 2019 et 2022 et la voie 3 n'ayant pas été étudiée.

CHAPITRE III

DE LA MAINTENANCE VERS LA MAINTENABILITE

(Approche rétroactive)

III. DE LA MAINTENANCE VERS LA MAINTENABILITE (approche rétroactive)

1. Introduction

Le chapitre II nous a amené à comprendre comment nous pouvions mieux intégrer l'EFH en maintenabilité, c'est-à-dire en phase de conception de la future maintenance. Et la différence est bien là : la maintenabilité pense, anticipe l'activité future de la maintenance ou améliore l'activité existante qui est réalisée par des opérateurs spécialisés dans des contextes de travail réglementés. Ainsi, avant de parler de transfert d'informations, de données, et de prise en compte des retours d'expérience vers le métier de la maintenabilité, il convient d'étudier et de comprendre l'activité réellement vécue chez les opérateurs de maintenance. Autrement dit, pour prendre en compte l'EFH dans les phases de conception, il est nécessaire de connaître les contraintes réelles des opérateurs. Or, dans le cas spécifique de la maintenance, tous domaines confondus, il semble que la littérature soit assez pauvre, que le nombre d'études qui s'est réellement penché sur les difficultés vécues des opérateurs soit faible (hors cadre d'évènements comme les incidents ou accidents). Plus précisément, il y a peu d'études qui tendent à avoir une approche systémique du travailleur en maintenance. Il existe soit des articles ne touchant que l'activité physique dans des contextes ou des phases bien particulières de l'activité globale, soit des articles ne touchant que l'aspect cognitif ou encore organisationnel. Des études holistiques mettant en avant la synergie entre les trois dimensions (physique, cognitive et organisationnelle) semblent rares. Pourtant, d'un point de vue juridique, 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, à 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). Au-delà de l'aspect réglementaire, le retour d'expérience des opérateurs de maintenance montre une réelle pénibilité de l'activité. En effet, l'organisation de la maintenance est reconnue pour engendrer une activité de travail pénible, voire très pénible (Virovac et al., 2017). Au-delà de l'organisation, les tâches réalisées par les opérateurs sont très variées et demandent également des savoirs et savoir-faire multiples. Par exemple, dans le secteur aéronautique, les opérateurs sont souvent amenés à devoir réaliser des tâches touchant aussi bien des ensembles mécaniques, que des ensembles hydrauliques voire électriques ce qui requièrent des compétences multiples et transverses (Kinnison, 2013).

Dans ce chapitre III, nous nous intéresserons d'abord de manière générique à la sécurité au travail et à l'impact global des maladies professionnelles qui surviennent au travail. Nous nous intéresserons ensuite à l'activité de maintenance avec des études globales démontrant la haute pénibilité relevée et ressentie par les opérateurs de maintenance. Nous détaillerons ensuite des observations et des études plus précises menées au sein de notre industriel aéronautique pour appuyer concrètement la nécessité de mieux comprendre les variabilités inhérentes aux activités de maintenance. Enfin, avant de conclure ce chapitre, nous nous intéresserons à l'importance des investigations des incidents et

des accidents, qui sont également une source essentielle de compréhension de l'activité de maintenance.

2. Sécurité au travail, quelques généralités (chiffres et réglementation)

La littérature exprime souvent que l'activité de maintenance est physiquement pénible (Borel et al., 2007 ; Chang et al, 2010). Nous entendons d'ailleurs souvent parler de troubles musculosquelettiques (TMS) pour évoquer les contraintes physiques au travail. Les TMS liés au travail sont un dommage qui affecte le système musculosquelettique du corps humain, en particulier au niveau des os, des disques vertébraux, des tendons, des articulations, des ligaments, du cartilage, des nerfs et des vaisseaux sanguins (NIOSH, 1997). Les TMS peuvent survenir dans toutes les parties du corps, bien que le dos, le cou, les épaules et les membres supérieurs soient les zones les plus touchées. Lorsque les TMS sont principalement causés ou aggravés par le travail et l'environnement de travail, ils sont appelés TMS liés au travail. Les principaux TMS liés aux activités professionnelles sont le syndrome du canal carpien, les tendinites (poignet, coude, épaule, ou au niveau du genou), les blessures de la coiffe des rotateurs affectant l'épaule, l'épicondylite affectant le coude, et les blessures au bas du dos (claquage musculaire ou entorse) (Ha & Roquelaure, 2010). Notons également que des symptômes associés aux TMS peuvent être observés sur les lieux de travail lorsqu'il y a un décalage entre la capacité physique humaine et les exigences physiques de la tâche professionnelle (Korhan et Memon, 2019), les facteurs de risque dits physiques générateurs de sur-sollicitassions de l'appareil locomoteur. Les TMS ont une incidence significative sur le monde professionnel puisque ces blessures résultent principalement d'exigences physiques (par exemple, mouvements répétitifs, tâches de levage, forces statiques et vibrations), mais les facteurs psychosociaux (par exemple, le stress au travail ou la pression temporelle) doivent également être pris en compte dans la stratégie de prévention. D'ailleurs, dans ce cadre, nous reviendrons en détail sur les risques physiques et psychosociaux dans la section 4 de ce chapitre pendant les activités de maintenance.

2.1. Impact global des maladies professionnelles

Avant d'introduire des chiffres sur les TMS, il convient de distinguer l'accident du travail de la maladie professionnelle. En effet, l'accident du travail se définit comme événement soudain qui crée une lésion corporelle alors que la maladie professionnelle se définit comme une affection de longue durée due aux activités professionnelles (INRS, 2017). Ainsi, un accident du travail peut ne pas impacter l'intégrité physique immédiatement mais peu favoriser un TMS si l'activité professionnelle entretient une lésion due à l'accident du travail. En France, quatre maladies professionnelles sur cinq sont aujourd'hui des TMS (INRS, 2020). Les articulations des membres supérieurs sont particulièrement à risque, l'épaule, le coude et le poignet/main représentant respectivement 30 %, 22 % et 38 % de l'ensemble des TMS. Si les TMS lombaires représentent 7 % des parties du corps touchées par les TMS, ils représentent 20 % des accidents du travail et 30 % des arrêts de travail de 6 mois en 2016. Les coûts directs des TMS pour les entreprises sont estimés à 2 milliards d'euros en 2017. Force est de constater

que les femmes sont significativement plus impactées par les TMS liés au travail que les hommes (respectivement 55% vs 45%) (INRS, 2020).

Dans tous les États membres de l'Union européenne, les TMS sont la principale cause d'incapacité de travail, d'arrêts de travail pour maladie, de « présentéisme » et de perte de productivité. Ils touchent au moins 100 millions de personnes en Europe, les maux de dos représentant la plus forte proportion d'années perdues pour cause d'invalidité avec les douleurs cervicales (Meidani, 2021). Du point de vue de la santé publique, les TMS représentent 40 % du coût de l'indemnisation des travailleurs dans certains pays de l'Union européenne (Eurofound, 2012). Cela peut entraîner une réduction de 1 à 2 % du produit intérieur brut de chaque État membre (Bevan, 2015). On remarque également que les taux de TMS déclarés dans le monde sont passés de 54,2 % à 60,1 % entre 2007 et 2013 dans l'Union européenne par exemple (Eurofound, 2017). Les facteurs de risque physique associés aux TMS suivent également cette tendance. Nous pouvons également noter qu'au niveau mondial, chaque minute, environ 640 travailleurs sont victimes d'accidents du travail et quatre travailleurs meurent d'un accident du travail ou d'une maladie professionnelle selon l'organisation internationale du travail (Chan et Man, 2022).

2.2. Liens entre TMS et activité de travail

Les TMS liés au travail peuvent être causés par différents facteurs de risque (ou combinaison de facteurs de risque) tels que les facteurs sociodémographiques, individuels, environnementaux, organisationnels, psychosociaux et physiques. La principale cause des TMS liés au travail semble être les facteurs de risque physique selon une étude menée en Angleterre (HSE, 2021), avec une augmentation drastique au cours des dernières années, en particulier pour les mouvements répétitifs des mains et des bras. Des études antérieures de la littérature ont trouvé des preuves d'une association entre TMS et les facteurs de risque physique suivants (El Braidy et al., 2022) :

- Posture ;
- Travailler dans des positions inconfortables ;
- Travail physique lourd ;
- Port de charge ;
- Travail répétitif ;
- Travail informatique prolongé.

Plus précisément, des études épidémiologiques antérieures ont fourni des preuves solides d'un lien biomécanique entre les expositions physiques au travail et le risque accru de TMS liés au travail (Bernhard, 1997 ; Keyserling et al., 1992 ; Marras et al., 1995 ; Punnett et al., 1991). Le modèle de traumatisme cumulatif fournit une explication, en particulier en raison des durées répétées et longues de manipulation de charges externes et/ou d'efforts puissants effectués tout au long de la journée de travail (Radwin et al., 2001). Ce modèle postule que la blessure résulte de l'effet cumulé de charges externes transitoires qui, prises isolément, peuvent ne pas révéler de potentiels traumatismes. Les expositions de durée répétitive et/ou prolongée provoquent des micros dommages cumulatifs qui peuvent, dans certains cas, présenter une sévérité élevée entrainant l'arrêt, voire l'accident de travail.

La prévalence des TMS en Europe est associée au travail dans des positions fatigantes ou douloureuses, au port ou au déplacement de charges lourdes et aux mouvements répétitifs des mains ou des bras (EASHW, 2019). Ceci s'applique aux TMS liés au dos, aux membres supérieurs et aux membres inférieurs. De plus, il faut noter que l'exposition aux vibrations des outils à main augmente également la probabilité de déclarer l'un de ces trois types de TMS. Enfin, il ne faut pas oublier qu'il existe un lien entre les TMS et la santé mentale, sachant que la combinaison de ces deux conditions est un facteur important inhibant le retour précoce au travail (Alavi et al., 2016).

2.3. Stratégie de prévention des TMS

Le travail et l'environnement de travail provoquent ou aggravent les TMS. Différentes stratégies peuvent ainsi être mises en place pour prévenir les TMS, allant de mesures techniques et d'ingénierie, en passant par des approches plus organisationnelles, jusqu'à des interventions centrées sur la personne. La législation de l'Union européenne mentionne que la prévention des TMS liés au travail doit être basée sur un processus d'évaluation des risques tout en respectant les principes généraux de prévention, par exemple, éviter les risques, évaluer les risques qui ne peuvent être évités, combattre les risques à la source, adapter le travail à l'individu, s'adapter au progrès technique, etc. (UE, 1989, juin 12). Plus généralement, l'apparition de TMS liés au travail peut être limitée avec différentes stratégies, qui peuvent être classées selon trois niveaux de prévention (EASHW, 2008 ; EASHW, 2022, 12 janvier) :

- **La prévention primaire** comprend le processus d'évaluation des risques et les interventions techniques/ergonomiques, organisationnelles et axées sur la personne :
    - *Processus d'évaluation des risques* : peut être considéré comme la base de la prévention des TMS au travail. En tant que mesure de prévention primaire, c'est-à-dire éviter l'apparition d'un trouble en réduisant ou en évitant les facteurs de risque, l'évaluation des risques EFH est l'examen systématique de tous les aspects du travail, en considérant et en évaluant l'exposition professionnelle et individuelle des travailleurs aux facteurs de risque physiques et psychosociaux. Le processus d'évaluation des risques permet d'identifier les priorités de prévention.
    - *Intervention technique/ergonomique* : vise à réduire la charge de travail physique et ainsi diminuer le risque de TMS. Ces interventions peuvent, entre autres, porter sur l'élimination ou la réduction des risques liés à la manutention manuelle de charges, au travail dans des postures contraignantes, au travail répétitif et aux tâches main-bras, etc. Dans ce but, différentes interventions techniques peuvent être proposées : automatisation ou mécanisation, réaménagement ergonomique du lieu de travail, introduction ou re-conception d'équipements et d'outils de travail EFH, utilisation d'exosquelettes (voir conclusion et perspectives en chapitre V) et d'équipements de protection.
    - *Interventions organisationnelles* : il s'agit d'un large éventail de mesures liées à l'organisation du travail afin d'améliorer l'environnement psychosocial du travail. Cela peut inclure la répartition des tâches de travail, la conception des tâches, les processus de travail, le rythme de travail, le style de gestion, le temps de travail, etc. Des exemples d'interventions organisationnelles comprennent l'adaptation de la

fréquence des cycles de travail, la modification de la fréquence/durée des pauses ou l'adaptation des tâches de travail.

- *Interventions axées sur la personne* : ces stratégies font référence à l'éducation, c'est-à-dire à des programmes d'orientation et de formation en matière d'EFH, afin de modifier leur comportement au travail. Les exercices physiques (échauffements) peuvent également être considérés comme des interventions axées sur la personne. L'objectif est de préserver la capacité physique du travailleur et ainsi réduire l'écart entre la charge de travail et la capacité du travailleur (Korhan et Memon, 2019), et ainsi éviter une sursollicitation.

- **La prévention secondaire**, implique l'identification et le suivi de la santé des travailleurs à risque. L'évaluation des risques peut également être appliquée comme mesure de prévention secondaire, c'est-à-dire la détection précoce des troubles et l'arrêt de leur progression, en identifiant les travailleurs à risque, en assurant le suivi systématique de leur santé et en recherchant les facteurs de causalité liés au travail. Cela devrait permettre des actions d'intervention précoces et éviter que les TMS aigus ne deviennent chroniques.
- **La prévention tertiaire**, comprend les actions de retour à l'emploi.

Ces approches généralistes vues dans cette section 5 apportent un argumentaire supplémentaire pour appuyer la nécessité de mieux prendre en compte la sécurité au travail et la santé. Préserver la santé des opérateurs de maintenance, c'est potentiellement améliorer leurs conditions de travail et leur donner la capacité d'être fiables et performants. Il est en effet important de rappeler ici qu'en termes de sécurité aérienne, la maintenance joue un rôle majeur puisqu'elle est la seconde source d'accidents, résultant d'erreurs humaines. Pour bien comprendre la complexité de l'activité de maintenance, la partie qui suit vise à expliquer pourquoi c'est une activité complexe, notamment liée aux contraintes physiques que subit l'opérateur mais pas seulement, puisque nous évoquerons aussi la pression subie, liée à une organisation changeante quotidiennement.

3. La maintenance, un contexte opérationnel complexe et changeant

Pour être fiable et disponible, un produit/système doit être maintenu en bon état tout au long de sa vie. Il doit ainsi assurer la fiabilité et la qualité pour lesquelles il a été conçu initialement (Kinnison, 2013). Cela implique une activité de maintenance très régulière, qu'elle soit planifiée ou inopinée lorsqu'une panne survient. En effet, l'organisation de la maintenance se révèle être complexe, changeante (Kinnison, 2013) et appelle de nombreux savoirs et savoir-faire (Misra, 2008). C'est également une activité jugée longue et complexe où il existe une forte diversité de tâches, d'environnements de travail… (Chang et Wang, 2010 ; Latorella et Prabhu, 2017). La Figure 8 montre quelques exemples de tâches de maintenance et quelques variabilités de postures, de sécurité, d'environnement…



Figure 8 : exemple de tâches de maintenance réalisées dans différentes conditions et sur différentes parties d'un hélicoptère.

Dans ce contexte, des études ont montré la difficulté perçue des opérateurs. Un sondage réalisé par l'Association Française des Ingénieurs en Maintenance (AFIM) auprès de 2500 opérateurs de maintenance à travers l'Europe, a montré que 62 % des opérateurs de maintenance jugent leur travail pénible. Plus précisément, il existe des facteurs de risque entrainant principalement des troubles musculosquelettiques. Il est également cité la pression temporelle avec la réalisation de tâches non programmées qui nécessitent une adaptation permanente de l'activité. L'opérateur, pour mener à bien sa mission, adopte des gestes, des postures pénibles, voire dangereuses, associés à des efforts souvent importants (Di Gironimo, 2004). De plus, l'activité de maintenance est une succession de tâches, voire de sous tâches qui requière une forte concentration et engendrent dès lors une charge cognitive connue et reconnue (Hobbs & Williamson, 2003). Par exemple, dans le domaine du transport aéronautique, ferroviaire ou automobile, des systèmes complexes comme la mécanique, l'hydraulique ou l'électrique cohabitent très souvent dans des espaces réduits. L'opérateur doit ainsi gérer l'intervention de maintenance dans des espaces très contraints physiquement avec un savoir et un savoir-faire touchant de multiples domaines pour réaliser une tâche. Dès lors, chacune de ces tâches, voire sous tâches, exige des activités physiques (postures, gestes, efforts, ports de charge, déplacement, …), sensorielles (prise d'informations visuelles, sonores, communications, …) et mentales (prise de décisions, choix, …) importantes. Cette pénibilité entraîne notamment un taux d'accidents du travail significatif. L'Agence Européenne pour la Santé et la Sécurité au Travail (2010) précise d'ailleurs que 15 % à 20 % de l'ensemble des accidents survenus en Europe en 2006 est lié aux opérations de maintenance du travail, dont 10 % à 15 % sont mortels. La maintenance représente également la deuxième cause d'incidents /accidents aériens, environ 12 %, après celle concernant les erreurs de pilotage (Hobbs & Williamson, 2003 ; Reason & Hobbs, 2017 ; Saleh et al., 2019). La sauvegarde de la santé et l'amélioration de la sécurité des opérateurs de maintenance restent ainsi des enjeux majeurs des études en maintenabilité. Ces questionnements sont d'autant plus pertinents

en aéronautique où les recommandations et les réglementations imposent des rythmes de maintenance réguliers, afin de veiller au respect des normes et standards en vigueur pour optimiser la sécurité. En effet, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) et l'ATA (Air Transport Association of American) définissent des recommandations à respecter pour assurer la maintenance et l'entretien des aéronefs dans le but d'accroître leur disponibilité tout en optimisant la fiabilité et les coûts (Dhillon et al., 2006 ; Fleischer et al., 2006). Ces recommandations servent de références pour définir des standards par d'autres autorités comme l'EASA en Europe (European Union Aviation Safety Agency). De plus, la complexité de l'activité de maintenance est accentuée par le contexte opérationnel très compétitif et concurrentiel où les prestations doivent toujours se faire plus vite tout en assurant le même niveau de sécurité (Cardile, 2004). Cependant, certaines études mettent en avant que d'un point de vue opérationnel, on constate que 50% des retards et des annulations de vols liés à des pannes moteurs ont pour origine une erreur de maintenance (Latorella, 2017). Ainsi, pour respecter la réglementation, les contraintes de l'opérateur, doivent être anticipées au plus tôt dans les processus de conception afin de palier, autant que possible, aux aléas organisationnels du terrain. Dès lors, pour qu'un produit/système soit maintenu, il doit être conçu afin que la maintenance soit réalisable par un ou des opérateurs, dans des contextes multiples avec un minimum de connaissances et d'outillages spécifiques. De plus, la maintenance est ancrée dans un cycle industriel où l'indicateur phare reste plus le coût que la santé et la sécurité des opérateurs. Plusieurs auteurs ont confirmé ce constat général au travers d'études menées dans plusieurs industries telles que l'exploitation des hélicoptères (Glade, 2005), le secteur automobile ou encore celui du nucléaire (Bataille & Galley, 1998). Notons néanmoins que la prise en compte de l'opérateur, et en particulier de sa santé et de sa sécurité, prend une place de plus en plus centrale dans la mise en place des activités de maintenance – nous ne parlons pas ici de la maintenabilité mais bien de l'organisation de la maintenance dans un atelier (Grusenmeyer & Nivelet, 2021). Afin de préserver durablement la performance des machines et la sécurité des personnes, la maintenance est donc devenue une activité de services qui demande un haut niveau d'exigence et des compétences particulières de la part des opérateurs de maintenance spécialisés. Il est donc nécessaire de mieux comprendre ces difficultés et la variabilité induite pour mieux concevoir la maintenance, donc en maintenabilité.

La suite de ce chapitre va se concentrer sur des études menées ces dernières années au sein d'Airbus, qui mettent clairement en avant l'impact de la difficulté de l'activité de maintenance sur l'Homme, lui imposant des contraintes qui influent directement sur sa santé et sa sécurité. Ces constats devront pouvoir être « traduits » pour être exploitables en bureau d'études pour mieux concevoir la maintenance autour de critères objectifs.

4. Compréhension de la pénibilité des opérateurs de maintenance

Dans cette partie, nous allons observer deux études menées au sein de notre industriel. Ces deux études sont des cas dits opérationnels, c'est-à-dire qu'elles ont été menées dans un but industriel

pour influencer l'architecture[5] de l'hélicoptère et les procédures de maintenance. Nous avons fait le choix, en parallèle, de profiter de ces études de cas pour évaluer la pénibilité et les risques pour l'opérateur. Le premier cas se focalise sur l'évaluation de la santé et la sécurité de l'opérateur (Bernard et al., 2021), le deuxième cas, quant à lui, porte sur le risque d'erreur humaine pouvant avoir un impact sur la sécurité des vols.

4.1. Dimension physique et cognitive : des tâches de maintenance contraignantes

4.1.1. Contexte de l'étude

Dans le cadre évoqué précédemment, la composante juridique notamment nous pousse à mieux comprendre et à mieux étudier l'activité des opérateurs de maintenance. Également, le retour d'expériences du terrain montre que l'organisation de la maintenance est reconnue pour engendrer une activité de travail pénible (Virovac et al., 2017). D'ailleurs, il est intéressant de constater que, dans le cadre de la pénibilité au travail, une dizaine de facteurs de risque a été retenue en 2010 (Code du travail—Article L41261-1 et D41261-1). Ces facteurs se répartissent en trois catégories : « contraintes physiques marquées » ; « environnement physique agressif » ; « rythmes de travail ». Parmi ces dix critères, nous trouvons les « manutentions manuelles de charges », les « postures pénibles » ou encore le « travail répétitif ». Nous observons d'ailleurs que la majorité des standards ou normes propose principalement des seuils de référence pour maîtriser la charge physique en termes de gestes répétitifs, de charges manipulées avec des fréquences rapprochées (AFNOR, NF EN ISO 1005-4, 2008 ; AFNOR, NF X35-109, 2011). Cependant, peu de ces standards semblent être adaptés et représentatifs de l'activité de maintenance, mettant ainsi en lumière des activités physiques très variables, non répétitives pouvant même être couplées à des efforts répétés et statiques (Klussmann et al., 2010). Les efforts statiques sont d'ailleurs reconnus comme plus pénalisant à court terme que les efforts répétés (Mehta & Agnew, 2012). De plus, la littérature dédiée à la santé et à la sécurité au travail en maintenance se focalise généralement sur une sous-activité et non sur l'ensemble de l'activité de maintenance (Di Gironimo et al., 2004 ; Chang & Wang, 2010 ; Yu et al., 2017). Ces travaux étudient d'ailleurs principalement des données non physiologiques, reposant sur la simulation partielle d'une situation de travail avec des résultats souvent qualitatifs. Ces méthodes de travail sont souvent celles utilisées par les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité. Nous avons donc décidé de nous pencher sur l'efficacité de la mesure physiologique dans un contexte d'activités de maintenance pour mieux comprendre les difficultés ressenties.

4.1.2. La charge physique et la charge cognitive, éléments nécessaires à la compréhension de l'activité de maintenance

Dans de nombreuses situations de travail, la donnée physiologique, voire psychophysiologique s'est révélée souvent indispensable pour comprendre objectivement les réelles difficultés ressenties et

[5] L'architecture comprend la forme globale du produit mais également l'agencement de tous les éléments qui le composent.

subies par les opérateurs. Borel et al., 2007 détaillent l'astreinte cardiaque pour des opérateurs de maintenance de pylônes électriques dont le relevé de fréquence cardiaque a mis en évidence un niveau de pénibilité très élevé. Boudet et al., 2018a expliquent la pertinence de l'étude de l'astreinte cardiaque et de sa prise en compte pour mieux établir l'organisation d'une unité hospitalière. Ainsi, depuis plusieurs années des méthodes et des outils se sont développés pour mesurer l'activité physique notamment à travers l'émergence des capteurs de mesures de la fréquence cardiaque (FC) (Hejjel & Istvan, 2001, Amiard et Libert, 2016). D'abord exploitée en médecine du sport, la fréquence cardiaque, mesurée par l'intermédiaire d'un cardio fréquencemètre (CFM) est désormais utilisée dans le monde du travail (Meyer, 1996). En effet, la mise en place de ce procédé est rapide, peu invasif (comparé à d'autres dispositifs de mesures physiologiques) et permet d'analyser rapidement des données physiologiques de référence (Malchaire, 1988 ; Meyer, 1996). Plus particulièrement, le Coût Cardiaque Relatif (CCR) est très répandu et est considéré comme une méthode « validée scientifiquement, facilement accessible et consensuelle » (Boudet et al., 2018b, p. 334). Cependant, la mesure de la fréquence cardiaque, pour être fiable dans son interprétation, est sensible à de nombreuses variables parasites. Plusieurs travaux mettent en avant le stress, la prise de repas associée au temps de digestion ou encore la température ambiante (Meyer, 1996 ; Robert et al., 2019). Par exemple, dans des conditions de températures ambiantes élevées, le rythme cardiaque va augmenter pour redistribuer les flux sanguins entre le noyau et l'écorce corporelle afin de maintenir l'homéothermie, c'est-à-dire l'équilibre entre la température cutanée et une température interne constante proche de 37◦C. Il convient dès lors de bien identifier ces variables parasites pour bien interpréter les données mesurées. Associée à cette charge physique, la charge mentale (dimension cognitive) joue également un rôle important. Plusieurs travaux mettent en avant le lien étroit entre ces deux dimensions (Mehta & Agnew, 2012 ; Wisner, 2015). Les travaux de Wisner (2015, p. 34), expliquent que « La notion de charge cognitive permet aussi de montrer qu'il n'y a pas d'activités physiques sans activités cognitives, que beaucoup des difficultés du travail physique ont pour origine la négligence des dimensions cognitives du travail ». Cependant, la maintenance, rappelons-le, est souvent une succession de tâches simples ou complexes, ne se ressemblant pas, avec des efforts physiques très variables. Certaines tâches sont donc admises comme complexes d'un point de vue cognitif avec une succession de nombreuses sous-tâches devant faire appel à des capacités de mémoire, d'interprétations pouvant mettre en difficulté les opérateurs. L'étude de Zafiharimalala & Tricot (2009) explique d'ailleurs que la documentation décrivant les procédures de maintenance doit être mieux construite pour épauler l'opérateur dans la mémorisation des nombreuses activités qu'il doit mener chaque jour.

4.1.3. Etude menée au sein d'Airbus

En lien avec la littérature évoquée précédemment, nous avons mené une large étude au sein de notre entreprise dont l'objectif a été double (Bernard et al., 2021). D'une part, nous avons souhaité montrer la pénibilité des tâches de maintenance dans le secteur de la maintenance aéronautique et plus particulièrement dans celui des hélicoptères. D'autre part, nous souhaitions mettre en avant la nécessité de mieux prendre en compte dans les phases de conception les dimensions physiques et cognitives des tâches de maintenance définies. Nous résumons nos travaux et les résultats pour étayer notre point de vue.

Notre étude a été menée sur une maquette physique représentant le plancher mécanique d'un hélicoptère, lieu où se trouve la motorisation comme l'illustre la Figure 9 suivante.



Figure 9: NH90 d'Airbus Helicopters exploité par l'Aviation légère de l'Armée de Terre (ALAT).

À partir de cette maquette physique, quatre tâches de maintenance ont été évaluées. Elles ont été sélectionnées pour leur récurrence et leur représentativité par rapport à l'ensemble de la machine en termes de postures, de gestes ou encore d'efforts. Sept opérateurs ont participé à l'étude, tous sélectionnés sur des critères d'expériences et anthropométriques pour assurer une parfaite représentativité de la population des opérateurs de maintenance. La Figure 10 suivante montre la posture principale adoptée dans la réalisation de chaque tâche.

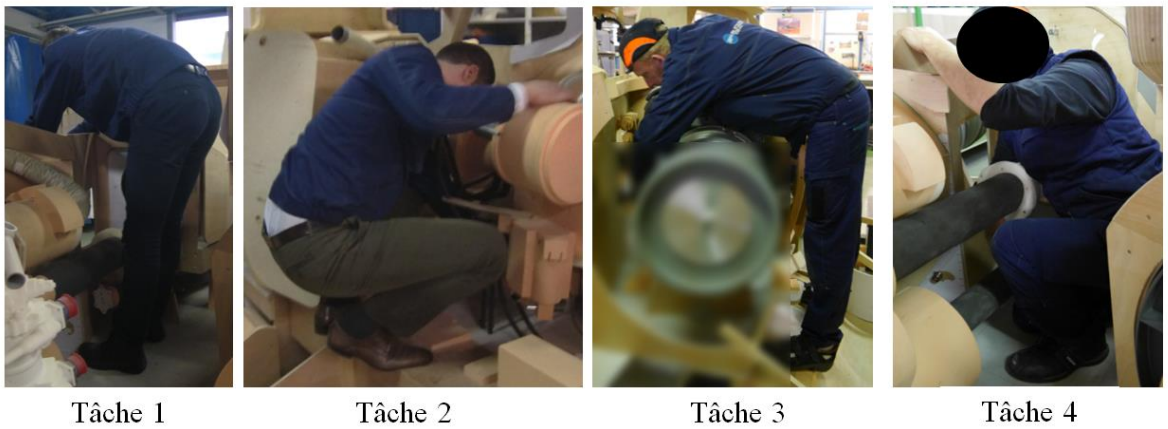


Figure 10: Postures principales de chacune des quatre tâches sélectionnées pour la réalisation de l'expérimentation.

Nous avons suivi un protocole strict, avec des indicateurs EFH et des outils de mesures associés afin d'analyser les deux dimensions (physique et cognitive). Le tableau 7 résume les indicateurs et les outils de mesures (Hart & Staveland, 1988 ; Frimat, 1989 ; Meunier, 1997) :

Tableau 7: Indicateurs EFH retenus, outils de mesure et scores associés.

Dimension du travail	Indicateurs retenus	Outils de mesures	Données/Mesures relevées	Unités
Composante physique	Coût Cardiaque Relatif (CCR)	Cardio-fréquencemètre (Polar V10, enregistrement toutes les secondes)	Echelle de Frimat	%
	Indice Delta FC (ΔFC)		≥20	b.min-1
Composante cognitive	Charge cognitive	NASA-TLX	Score sur une échelle de 0 à 100	Sans Dim.

Nos résultats montrent, dans un premier temps, sur l'ensemble des quatre tâches et tous opérateurs confondus, que l'astreinte cardiaque est élevée, considérée de « plutôt lourde » à « lourde » selon l'échelle de Frimat, 1989. Ainsi, l'activité de maintenance est considérée comme physiquement pénible, en cohérence avec de nombreuses observations et travaux de recherche (Borel et al., 2007). Giovanelli & Touchard, 2018, détaillent la pénibilité et la nécessité d'assister les opérateurs par des exosquelettes pour certaines tâches de maintenance des trains ; ou encore les travaux de Fajardo, & Ortiz (2016) détaillent les risques de la région lombaire pour les opérateurs de maintenance des avions. Les contraintes physiques y sont clairement établies.

En détail, nos résultats statistiques montrent des différences significatives entre les opérateurs, notamment au regard du Coût Cardiaque Relatif (CCR), rapporté à l'échelle de Frimat. Nous observons ainsi trois groupes, le premier avec une astreinte cardiaque entre « modérée » à « plutôt lourde », le second groupe, avec une astreinte cardiaque « plutôt lourde » et le denier groupe, avec une astreinte cardiaque « lourde ».
Le dénominateur commun à ces trois groupes semble être l'âge. En effet, le CCR le plus bas concerne l'opérateur le plus jeune, âgé de 24 ans. Le second groupe concerne quatre opérateurs avec une moyenne de 34,5 années (±4,8 années). Le dernier groupe concerne l'opérateur le plus âgé (49 ans) mais aussi le seul opérateur fumeur de notre population étudiée. Il est cohérent, d'une part, d'observer un CCR qui augmente avec l'âge, puisque cette donnée dépend de la fréquence cardiaque maximale théorique qui elle-même dépend de l'âge. D'autre part, être fumeur est un facteur aggravant et peut expliquer l'accroissement plus rapide et plus élevé de la fréquence cardiaque lors de l'effort (Dalkou & Clair, 2017). Surtout, nous pouvons noter que, quel que soit l'âge de l'opérateur, la charge physique est au-dessus de la moyenne avec une astreinte physique et un indice Delta FC élevé, au-dessus du seuil dit de « pénibilité acceptable » (Frimat et al., 1989 ; Maunier, 1997).

Nous avons également observé la charge physique tâche par tâche. Tout d'abord, nous avons réalisé le test statistique de Friedman comparant la fréquence cardiaque de nos trois groupes d'opérateurs précédents. Le test montre des écarts très significatifs quelle que soit la tâche mais qui tendent à diminuer progressivement entre la tâche 1 (celle avec effort statique) et les trois tâches qui suivent, sans effort spécifique mais uniquement avec des postures complexes. La baisse de la fréquence est donc cohérente puisque les tâches 2, 3 et 4 sont plus faciles physiquement que la tâche 1. La Figure 11 ci-dessous montre le phénomène. Cependant, pour chacune des tâches, le CCR est supérieur au seuil de pénibilité acceptable. Nous pouvons également observer que le CCR moyen est plus élevé en tâches 2 et 3 que pour la tâche 1 alors que cette dernière est la plus pénible physiquement (port de charge, effort statique prolongé, posture dégradée…). Nous pouvons expliquer ce phénomène d'une part à cause du manque de récupération des opérateurs, et donc l'absence de pause, entre les tâches et d'autre part par la posture adoptée en tâche 2 (à genoux et flexion à 90° du tronc) qui entretient une fréquence cardiaque plus élevée que la fréquence cardiaque au repos. Ces deux facteurs combinés entraînent une légère augmentation de la fréquence cardiaque au début de la tâche 2 avant une diminution lente qui se poursuit sur les tâches 3 et 4.

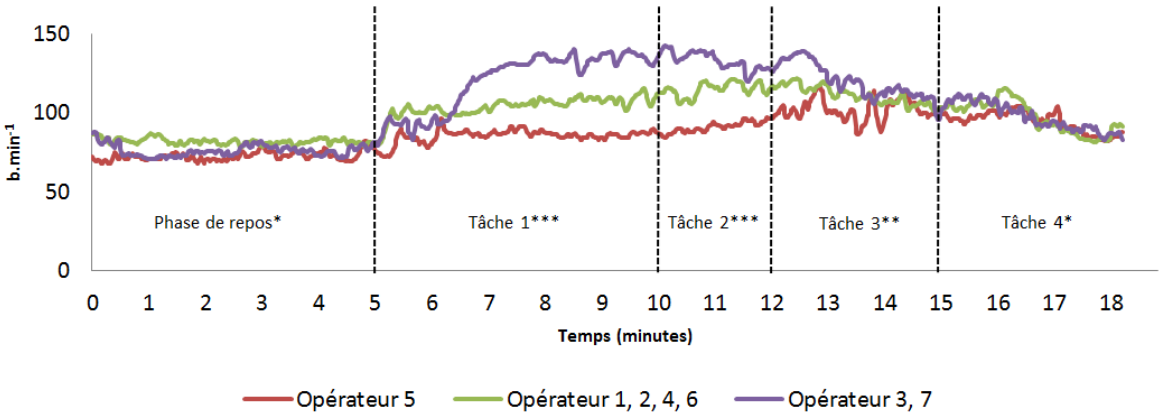


*Figure 11: Comparaison de la fréquence cardiaque des trois groupes d'opérateurs (5 - 1, 2, 4, 6 - 3, 7) en fonction des cinq séquences de l'expérimentation (Friedman * : p ≤ .05 ; ** : p ≤ .01 ; *** : p ≤ .001) (Bernard et al., 2021).*

Notre étude a donc montré la nécessité de mieux organiser les séquences de maintenance en fonction de leurs difficultés physiques. Les tâches de maintenance doivent pouvoir être sélectionnées en fonction de leurs difficultés pour alterner des tâches difficiles et moins difficiles. Également, la variabilité et la diversité motrice des gestes peuvent être étudiées pour s'affranchir de mouvements similaires entre des tâches différentes (Lémonie, 2019). L'enjeu est triple : préserver l'opérateur, sa sécurité et assurer une productivité efficace. Au-delà d'une organisation spécifique du séquencement des tâches dépendant de leurs difficultés, nous pouvons recommander la mise en place de pauses au sein ou entre certaines tâches afin d'assurer un certain niveau de récupération physique. Ces pauses doivent pouvoir être adaptées en fonction de l'effort physique et de la durée d'exposition. Ainsi, afin d'assurer une récupération efficace il convient d'abord d'impacter la conception de la tâche de maintenance. Par exemple, en concevant l'environnement de travail pour permettre aux opérateurs d'avoir des temps de repos (sièges, confort thermique, point d'eau…) ou encore s'assurer que la fréquence des actions techniques soit conforme aux normes. Il s'agit aussi de spécifier les meilleures conditions pour effectuer ce repos pendant l'activité : posture (assis, debout…), temps de pause et boisson (Atain-Kouadio et al., 2014). Dès lors, nous pouvons émettre une recommandation : insérer dans les procédures de maintenance, conçues en maintenabilité, les périodes de repos préconisées faisant suite à des activités de maintenance identifiées comme physiquement pénibles. Cette recommandation se fonde sur le constat de l'étude de Zafiharimalala, & Tricot, 2009, suggérant des procédures de maintenance plus claires et surtout adaptées à l'activité réelle. Cependant, au-delà d'un environnement de travail adapté et de procédures guidant l'opérateur, l'organisation du travail doit permettre à l'opérateur de réguler temporellement son activité lorsqu'il en ressentira le besoin (Atain-Kouadio et al., 2014).

Enfin, sur la base de nos résultats, l'évaluation de la charge cognitive ne montre pas de différences significatives entre les opérateurs. Cette évaluation n'a été effectuée qu'à la fin de l'enchaînement des quatre tâches pour ne pas perturber les opérateurs pendant la simulation. En effet, le score global moyen du NASA-TLX est parfaitement dans la moyenne d'une charge cognitive classique, ne supposant donc pas de surcharge ou de sous-charge (Hart & Staveland, 2988). En revanche, l'analyse détaillée des scores, qui eux-mêmes ne présentent pas de différences significatives entre les opérateurs, permet de nuancer le score global. Tout d'abord, le score pour les catégories « exigence physique » et « effort » est très élevé, en cohérence avec l'analyse de la fréquence cardiaque ci-

dessus. En revanche, la catégorie « exigence cognitive » présente un score très faible inclus dans la catégorie « sous-charge cognitive ». Ce score est également cohérent avec le choix de nos tâches initiales, toutes extrêmement simples, courtes, appelant un savoir et un savoir-faire de base, sans usage d'outils spécifiques, sans mémorisation de séquences longues et complexes. Dès lors, nous pouvons supposer que le score global de la charge cognitive a été principalement influencé par la charge physique. Le lien entre charge physique et charge cognitive est donc établi dans notre situation de travail. Cependant, contrairement à certains travaux expliquant « *que beaucoup des difficultés du travail physique ont pour origine la négligence des dimensions cognitives du travail* » (Wisner, 2015, p. 34), notre cas d'étude, bien spécifique à la maintenance aéronautique, tend à nuancer ces propos. C'est bien la charge physique qui vient influencer la charge mentale (dimension cognitive). D'ailleurs, l'irritation psychologique ressentie et verbalisée par les opérateurs, incitant à terminer au plus vite la tâche, semble être principalement due à la charge physique entraînant des douleurs clairement exprimées.

Si nous nous plaçons dans un contexte de bureau d'études, et plus particulièrement en maintenabilité, la donnée physiologique, quantifiée, est d'autant plus essentielle qu'elle peut jouer le rôle « d'électrochoc » auprès d'une population qui a un rôle prépondérant dans la conception de produits, dont l'usage futur est souvent mal compris. En effet, une des grandes problématiques dans la conception de produits/systèmes centrée sur l'humain – conception anthropocentrée (Sagot, 1999) – est le manque de compromis entre les critères mécaniques et les critères EFH. Ainsi, cette expérimentation renforce encore davantage les constats du chapitre II. Il est nécessaire d'apporter aux non spécialistes en EFH des « preuves » de l'impact de l'activité de maintenance sur le travailleur. Même si l'impact est d'abord sur la santé et la sécurité du point de vue de l'ergonome, pour l'ingénieur-concepteur c'est davantage la performance qui peut être dégradée, avec un temps de réalisation qui peut s'allonger et la maintenance qui sera plus coûteuse. Ainsi, ce manque de connaissances des ingénieurs-concepteurs touche aussi bien la connaissance stricte de la discipline de l'EFH mais également les outils de mesures qui y sont associés. Plusieurs travaux montrent, par exemple, qu'il existe pourtant des outils d'analyse communs entre ingénieurs-concepteurs et ergonomes tels que les outils de simulation, qu'ils soient digitaux (mannequin numérique, réalité virtuelle) ou physiques (maquette physique comme celle exploitée pour notre expérimentation) (Kaljun & Dolsak, 2012 ; Bernard et al., 2020). Deuxièmement, pour que la connaissance en EFH se pérennise en bureaux d'études, il faut convaincre les ingénieurs-concepteurs de sa nécessité.

Notre étude a été réalisée dans le contexte industriel d'un grand constructeur mondial d'hélicoptères. Nous avons donc dû adapter notre protocole à ce contexte et aux contraintes induites. Dans le temps qui nous a été accordé, nous avons analysé quatre tâches. Ce faible nombre peut représenter un biais expérimental, néanmoins, leur sélection a permis de choisir quatre tâches parfaitement représentatives des tâches réalisées très régulièrement sur ce type de système. Les résultats obtenus permettent, de plus, d'être confortés par la littérature assurant ainsi une cohérence dans l'analyse menée. Il conviendra néanmoins de porter cette analyse sur une plus grande série de tâches pour assurer une analyse de l'activité physique dans des temps d'exécution plus longs et des tâches de maintenance plus variées. Également, ces mêmes contraintes industrielles nous ont imposé de déployer des méthodes d'analyses et des outils associés simples et rapides à mettre en œuvre pour éviter un temps « d'immobilisation » trop long des opérateurs.

4.1.4. Conclusion de l'étude

La mesure physiologique dans un contexte d'activités de maintenance semble avoir été bénéfique. En effet, l'analyse des dimensions physiques et cognitives de quatre tâches de maintenance récurrentes sur hélicoptère a mis en évidence qu'une prise en compte de ces deux composantes de pénibilité au travail est nécessaire voire indispensable. Plus particulièrement, la mesure de la fréquence cardiaque a mis en avant des Coûts Cardiaques Relatifs très élevés sur des tâches définies initialement comme sans effort physique. Ce constat s'explique par l'organisation de la maintenance qui impose d'enchaîner des tâches physiquement pénibles et des tâches sans contrainte physique particulière. L'inertie cardiaque demeure réelle dans un tel contexte, entretenant ainsi des fréquences élevées même lorsque la tâche ne présente pas de difficultés autour de la dimension physique. Il semble donc essentiel d'anticiper l'activité de maintenance pour mieux la concevoir. Par exemple, en introduisant des temps de pause directement dans les procédures incluant des tâches préalablement définies comme physiquement pénibles. Ainsi, la conception de la maintenance, menée en bureau d'études au travers du département maintenabilité, doit mieux prendre en compte les dimensions physiques et cognitives des tâches définies. Pour se faire, nous proposons, à travers des analyses quantitatives de l'EFH et des formations, de montrer aux ingénieurs-concepteurs l'impact de l'activité de maintenance sur l'opérateur. Les ingénieurs-concepteurs seront ainsi mieux sensibilisés aux contraintes réelles subies par les opérateurs de maintenance et sauront ainsi mieux comprendre les conséquences de leurs choix de conception.

Même si l'activité physique élevée représente une bonne partie du travail d'un opérateur de maintenance, il existe un autre type de tâche, peut être encore plus récurrent mais qui n'engage pas de contraintes physiques élevées : les tâches d'inspection. En revanche, ce type de tâche engage la concentration, l'attention de l'opérateur et ce pour des durées parfois longues, des fréquences très élevées avec une sollicitation de plusieurs de nos cinq sens. La partie qui suit vise ainsi à étudier une de ces tâches pour en comprendre la complexité.

4.2. Les tâches d'inspection : complexité et savoir-faire

En aéronautique, les tâches dites d'inspection sont les plus récurrentes. Elles permettent, par l'intermédiaire de quatre sens sur cinq (la vue, l'ouïe, le toucher et l'odorat) de vérifier l'état d'un appareil, d'une structure ou encore d'une pièce. Ces inspections sont réalisées par les opérateurs de maintenance :

- Tous les jours : avant chaque vol en ouvrant les capots pour s'assurer, par exemple, qu'il n'y ait pas de corps étrangers dans des endroits sensibles de l'aéronef (appelé communément FOD pour « Foreign Object Damages/Débris »),
- De manière cyclique (maintenance prévisionnelle ou programmée) : le constructeur impose des vérifications après une certaine période de vol (50H, 300H…1200H). En général, plus l'échéance est tardive, plus l'inspection est poussée,
- De manière inopinée (maintenance non programmée) : suite à une panne, ou à une alerte dans le cockpit (signal visuel ou sonore).

De manière générale, nous parlons de vérifications visuelles qui sont les plus répandues et nécessitent un haut niveau de concentration. L'agence européenne de la sécurité aérienne (EASA - European Aviation Safety Agency) délivre la PART 145, un agrément obligatoire pour assurer la maintenance d'aéronefs en « Transport Aérien Commercial » et « Aéronefs complexes » (définition dans le Règlement EU No 216/2008). Cet agrément décrit, dans son annexe AMC 145.A.10, que la maintenance doit inclure la « Maintenance et/ou contrôles programmés, y compris des inspections visuelles qui détecteront des conditions insatisfaisantes évidentes ». Dans ce cadre, il existe trois types d'inspections, toujours définies dans la PART 145. Le tableau 8 résume les trois niveaux et les exigences engagées :

Tableau 8: Définition générale des trois types d'inspection visuelle.

<table>
<tr><th>Inspection visuelle générale</th><th>Inspection visuelle détaillée</th><th>Inspection visuelle détaillée spéciale</th></tr>
<tr><td colspan="3">Nettoyer la surface à inspecter.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Utilisez un miroir et/ou une lampe de poche si nécessaire.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Détecter les dommages évidents, les défaillances, les irrégularités.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Améliorer l'accessibilité en déposant ou en ouvrant les panneaux, les portes ou les capots.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Assurer la sécurité, la stabilité et la proximité des plates-formes et des équipements de travail en hauteur.</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Inspecter depuis une distance appropriée pour détecter l'ensemble des défauts recherchés</td><td>Effectuer un examen visuel intensif d'une zone spécifique telle que le système, l'installation ou l'assemblage.</td><td>Effectuer un examen visuel intensif d'un ou de plusieurs éléments spécifiques, en particulier si ces éléments sont cachés ou si l'accessibilité visuelle est très faible.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Assurer une visibilité optimale, sans ombre projetée.</td></tr>
<tr><td></td><td>Utiliser des outils ou techniques spécifiques tels que l'endoscope.</td></tr>
</table>

De par leur récurrence, parfois très rapprochée dans le temps, un opérateur de maintenance, par routine, peut omettre certaines inspections et/ou ne plus réaliser avec minutie l'inspection. Une revue de littérature (Yasuda et al., 2022) met par ailleurs en avant la rareté des publications dans le domaine de l'inspection des aéronefs et un manque de systèmes d'inspection intelligents pouvant assister un opérateur. La littérature est notamment pauvre en termes de spécifications des exigences pour le développement des inspections, les tests et la validation des méthodes associées. Néanmoins, certaines études montrent les balbutiements de développement d'outils informatiques afin d'automatiser ou d'assister l'opérateur de maintenance (Yasuda et al., 2022). Mais cette approche, se basant sur des observations industrielles doit pouvoir, avec une approche scientifique, fiabiliser les usages, les méthodes et les outils associés.

Cependant, l'inspection dite visuelle ne s'arrête pas uniquement au sens de la vue. L'action réelle des opérateurs cachent l'utilisation d'autres sens. L'autorité de régulation américaine, la FFA (Federal Aviation Administration), définit dans sa circulaire AC43-204, p. 1, l'inspection visuelle « comme le processus d'utilisation de l'œil, seul ou en conjonction avec diverses aides, comme mécanisme de détection à partir duquel un jugement peut être porté sur l'état d'une unité à inspecter ». La vue, mais aussi le toucher par exemple, sont très souvent utilisés en même temps pour détecter un défaut sur une surface. L'endoscope peut également être utilisé pour accéder à des zones invisibles à l'œil. Toutes ces approches nécessitent d'être fiabilisées à travers des développements de connaissances et des procédures. Par exemple, dans un contexte industriel, il est reconnu que l'inspection visuelle par endoscopie peut générer des erreurs, notamment par la perte de repère spatial, concrétisée par un phénomène d'inversion. En effet, lorsque la caméra de l'endoscope avance en direction de l'opérateur, un mouvement de la main vers la droite génère un mouvement de l'écran vers la gauche. Les Figures 12 et 13 montrent l'usage d'un endoscope lors d'une inspection sur un hélicoptère.



Figure 12: Exemple d'endoscope composé d'une cellule avec un écran, et d'une caméra localisée au bout d'un



Figure 13: Exemple d'usage d'un endoscope pour réaliser une inspection sur un hélicoptère.

Dans ce contexte, nous proposons de détailler une analyse d'une inspection dite sensitive. Cette inspection est intéressante car elle va au-delà du cadre visuel en demandant aux opérateurs de sentir, détecter un défaut par le sens du toucher uniquement.

4.2.1. Contexte industriel de l'étude

L'étude menée au sein d'Airbus porte sur la capacité des opérateurs à détecter des défauts dans un roulement à billes lors d'une vérification sensitive, c'est-à-dire par la simple manipulation de ce dit roulement. Pour bien comprendre le contexte, nous nous situons sur le rotor d'un hélicoptère comme

le montre la Figure 14. L'opération de maintenance consiste à déconnecter les bielles qui font le lien entre le plateau cyclique et les pales. Par cette déconnection, l'opérateur rend libre et sans contrainte le plateau cyclique qui peut dès lors tourner sur lui-même. L'opération est directement réalisée sur l'hélicoptère dans l'atelier du client.



Figure 14: Hélicoptère H130 avec un exemple de tête rotor montrant la pièce à vérifier, appelée « plateau cyclique ».

La demande industrielle initiale est de pouvoir qualifier et surtout quantifier la capacité des opérateurs à détecter un défaut dans le roulement à billes en manipulant uniquement le plateau cyclique, donc par la voie d'une détection dite sensitive, voire auditive si ce défaut génère une onde sonore. Nous appelons ce type de tâche une « inspection sensitive ».

4.2.2. Etude menée au sein d'Airbus

L'étude n'ayant pas fait l'objet d'une publication scientifique, nous proposons ici de rentrer dans le détail du protocole établi dans un contexte industriel en respectant la confidentialité industrielle. En effet, il est important de bien comprendre l'enjeu et les contraintes industrielles (en termes de coûts, de délais et d'objectifs industriels) qui ont guidé la construction du protocole pour réaliser cette analyse.

4.2.2.1. Contrôle des variables parasites

Cette section identifie toutes les variables parasites connues (c'est-à-dire les variables permettant d'influencer la variable mesurable, comme la perception du dommage) afin d'assurer la fiabilité du test.

Qualification / Expérience

La qualification et l'expérience de l'opérateur sont considérées comme des critères impactant la dimension organisationnelle. L'expérience et la qualification des opérateurs sont probablement les variables les plus importantes. Un opérateur sans qualification dédiée aux « inspections sensitives » ou sans expérience avec « l'inspection sensitive » pourrait avoir une probabilité plus faible de détecter des dommages qu'un opérateur qualifié et expérimenté. Pour maîtriser ces deux variables, la sélection des opérateurs a été guidée par des critères de qualification/expérience, détaillés dans le protocole d'essai (voir §4.2.2.2.).

Equipements de protection individuelle (gants, vêtements, etc..)

La tâche de maintenance étudiée peut être réalisée avec ou sans EPI (Equipement de Protection Individuelle) comme des « gants ». Si les gants sont utilisés, il n'y a aucun impact sur la sensibilité de l'opérateur. De plus, il n'y a aucune perturbation quelle que soit la tenue vestimentaire portée par l'opérateur (vêtements été/hiver). En effet, les dommages ne se font pas sentir en touchant la surface mais en déplaçant les plateaux cycliques avec les mains. Ce mouvement induit que le dommage est ressenti par la chaîne musculosquelettique mains/bras/coudes jouant le rôle de capteur.

Distanciation temporelle

Afin d'éviter tout biais sur la comparaison entre les roulements à billes de chaque plateau cyclique, pour chaque opérateur, les essais doivent être espacés de 3 jours minimum. En effet, la recherche des dommages est enregistrée dans la « mémoire sensorielle » voire dans la mémoire à court terme, à travers un stimulus, et au bout de quelques jours un humain oublie les détails de la perception du test (Aylwin, 1988), d'autant plus que cette inspection n'est réellement pas répétée régulièrement. La mémoire sensorielle n'a qu'une durée de quelques secondes mais suivant la perception de l'information (ici l'opérateur sait qu'il va devoir refaire un test) elle peut être enregistrée dans la mémoire à court terme (dite aussi de « travail »). Dans notre cas, nous parlons précisément de mémoire de travail puisque l'information est retenue en manipulant le plateau cyclique et donc en exécutant une action, ce qui peut générer un phénomène de comparaison si les essais ne sont pas espacés dans le temps. Même si le cerveau ne peut traiter à la fois que quelques données, les

nouvelles informations reçues chassent les précédentes mais peuvent être stockées quelques jours puisque l'opérateur sait qu'il va devoir reproduire le même essai.

Test en aveugle

Pour chaque opérateur de la population étudiée (voir §4.2.2.2.), quatre essais différents seront effectués sur quatre ensembles de plateaux cycliques, les opérateurs participant à l'observation pourront échanger des informations sur les roulements à billes des plateaux cycliques testés. Pour éviter tout biais, le test sera réalisé pour chaque opérateur en condition de test en double aveugle :

- La position de chaque plateau cyclique doit être modifiée à chaque observation, comme décrit au §§4.2.2.2., pour éviter les biais de mémoire spatiale ;
- Chaque opérateur ne doit pas savoir si les roulements à billes des plateaux cycliques sont endommagés ou non.

Conditions environnementales

Quelles que soient les conditions environnementales de température et d'humidité lors de l'exécution de la tâche de maintenance, il n'y a pas d'impact sur la sensibilité de l'opérateur car lors du contrôle sensitif les dommages potentiels ne sont pas ressentis en touchant la surface du bout des doigts mais en déplaçant les plateaux cycliques avec les mains induisant que la perception des dommages est ressentie par la chaîne musculosquelettique mains/bras/coudes jouant le rôle de capteur, et non affectée par les fluctuations des conditions environnementales de maintenance.

Concernant la charge cognitive, le contrôle sensitif est court (moins de 3 minutes environ) ; l'opérateur peut rester concentré sur sa tâche. Les dommages pouvant aussi, dans une moindre mesure, se faire ressentir par un bruit, il convient de réaliser l'essai dans un environnement où le niveau sonore ambiant est très faible.

Morphologie / anthropométrie

L'anthropométrie n'est pas considérée comme déterminante dans cette tâche de maintenance. L'anthropométrie doit être étudiée lorsque l'accessibilité (visuelle et physique) est nettement engagée, ce qui n'est pas le cas pour évaluer l'endommagement des paliers des plateaux cycliques par contrôle sensible.

4.2.2.2. Protocole

Matériel

La réalisation de l'essai étant longue (étalée sur plusieurs semaines), la disponibilité d'un hélicoptère sur une telle période est impossible. L'essai doit donc être réalisé par l'intermédiaire d'une simulation. Le test doit être représentatif de la situation réelle de travail du point de vue de l'accessibilité. La simulation de la tâche est réalisée sur table afin de positionner l'ensemble des plateaux cycliques dans des conditions représentatives de celles rencontrées lors de la maintenance sur un hélicoptère.

Dans ces conditions, les considérations sont l'accessibilité physique et visuelle de l'ensemble des plateaux cycliques lors de la tâche de maintenance. Une simulation grâce au mannequin numérique (Human builder, Catia V5) a été utilisée pour étudier l'interaction entre l'opérateur, l'assemblage des

plateaux cycliques et le milieu environnant, afin de s'assurer en avance de phase de la valeur écologique de la simulation sur table. La Figure 15 montre un exemple de la simulation pour anticiper le dispositif réel.

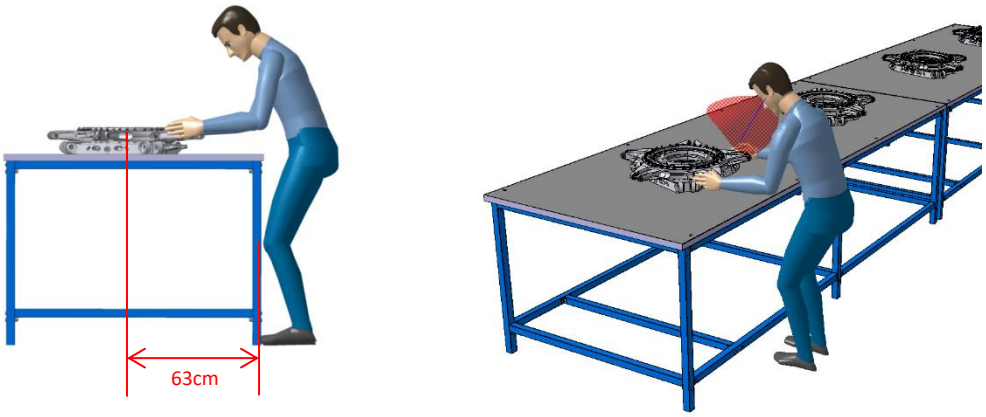


Figure 15: Représentation du plateau cyclique conforme à son positionnement sur hélicoptère, induisant ainsi les mêmes conditions pour l'opérateur, en termes de posture.

Sur la table, quatre plateaux cycliques sont disposés, deux avec un dommage et deux sans dommage.

Participants

Une étude de population comparative suivant un protocole en cohérence avec les contraintes industrielles, notamment de disponibilité d'opérateurs de maintenance a été proposée. L'étude est basée sur l'analyse d'une population d'opérateurs, statistiquement représentative, avec un échantillon de population de minimum 30 opérateurs comprenant la répartition suivante afin de couvrir la population d'opérateurs pouvant réaliser ce type de tâches chez les clients :

- Au moins 10 opérateurs ayant moins de 10 ans d'expérience comme opérateur de maintenance qualifié, mais non formés à la procédure de détection sensible ;
- Au moins 10 opérateurs ayant plus de 10 ans d'expérience comme opérateur de maintenance qualifié, mais non formés à la procédure de détection sensible ;
- Au moins 10 opérateurs de maintenance qualifiés, et formés à la procédure de détection sensible sur roulement à billes des plateaux cycliques.

Consignes de l'essai

Afin de couvrir les paramètres influents sur l'EFH, les instructions suivantes doivent être observées pour éviter d'introduire une influence sur les résultats (biais) pendant le test :

- Les opérateurs ne doivent pas savoir qui participe au test pour éviter l'anticipation ou l'influence entre opérateurs. La neutralité du retour opérateur est ainsi assurée ;
- Les opérateurs sont accueillis individuellement, au créneau défini, pour éviter la communication entre collègues sur les résultats ;
- Les opérateurs ne doivent pas savoir si les roulements à billes des plateaux cycliques sont endommagés ou non (test en aveugle) ;

- Quatre sessions (une pour chaque roulement de plateau cyclique à tester) sont organisées, espacées de 3 jours minimum afin d'éviter tout biais sur la comparaison sensible entre chaque roulement à billes du plateau cyclique ;
- La position de chaque ensemble de plateaux cycliques doit changer à chaque observation (voir détails dans la Figure 16 ci-après), pour éviter les biais de mémoire spatiale.

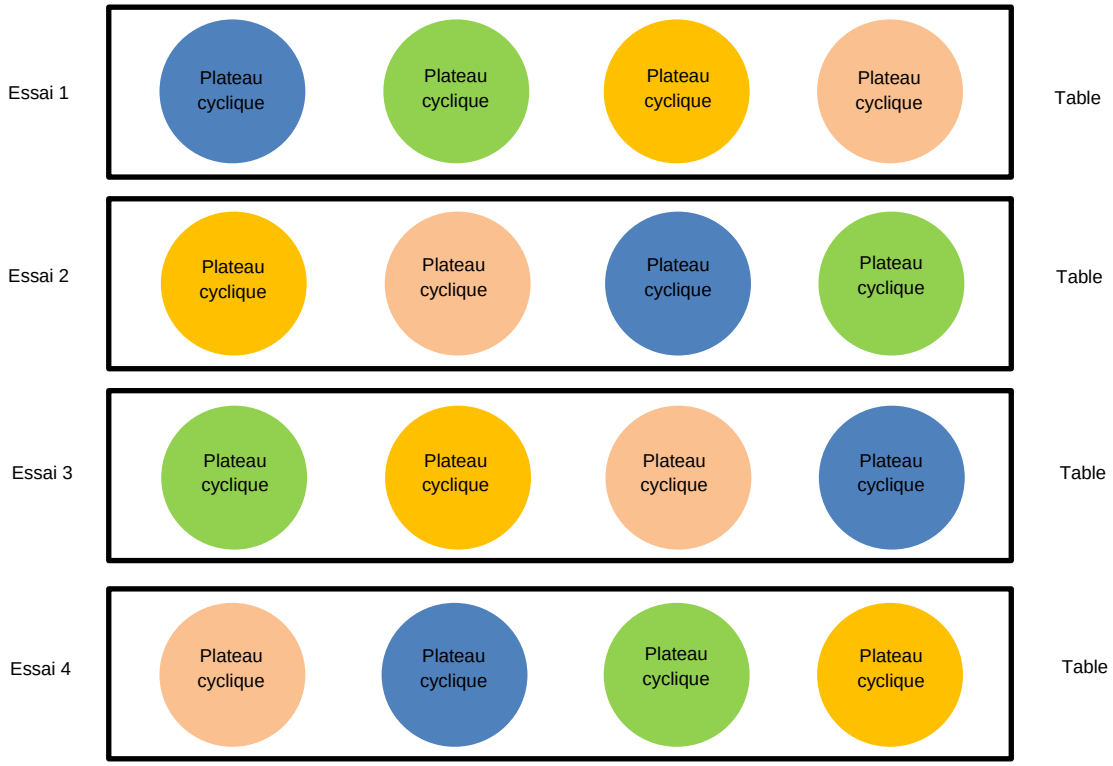


Figure 16: Positionnement des plateaux cycliques pour chacune des quatre sessions.

Procédure adressée aux participants

La procédure doit être strictement suivie pour garantir des résultats quantifiables et interprétables. Des questionnaires ont été établis. Il s'agit de questionnaires à choix multiples, un avant le premier test et un à la fin de chaque test. Le questionnaire a été mené à l'aide de onze questions. Ces questions ont été définies en fonction de la documentation sur la conception d'enquêtes. Un expert en EFH et en conception de maintenabilité a revu et révisé le questionnaire.

Les données recueillies à l'aide du questionnaire se composent de deux parties :

- La première partie (Enquête #1) porte sur des informations démographiques sous la forme d'un questionnaire sur la qualification et l'expérience de chaque opérateur, telles que l'âge, la profession, la formation/le parcours et l'expertise.
- La deuxième partie (Enquête #2) remplie après chaque test par chaque opérateur, fournit un retour d'expérience sur la détection des dommages. Une seule question sera posée à l'opérateur : le dommage est-il détecté ? (Oui/Non).

4.2.2.3. Résultats

Les résultats présentés et les recommandations associées sont limités aux informations et données publiables. Néanmoins, ces informations sont suffisantes selon nous pour comprendre toute la difficulté de la tâche et l'intérêt de la rigueur à déployer pour assurer une haute fiabilité de détection de dommages.

Population

Cette analyse est basée sur un total de 34 opérateurs, 33 hommes et 1 femme, âgés de 27 à 59 ans (moyenne : 43,6, écart-type : 8,4). Cette distribution couvre un large éventail d'âges et est considérée comme représentative d'une population d'opérateurs de maintenance. Cet échantillon de 34 opérateurs de maintenance travaille sur 7 types d'hélicoptères différents.

De plus, tous les opérateurs ont leur propre expérience dans l'industrie (privé, militaire, compagnie aérienne, …) et tous les opérateurs ont reçu une formation initiale dans des structures publiques (universitaire, militaire). Dans le détail, 11 opérateurs sont issus de structures militaires et 23 opérateurs sont issus de formations dans des structures académiques (universités) et des compagnies aériennes privées pour la pratique. Avant de rejoindre Airbus, 23 opérateurs ont eu une expérience privée dans l'industrie de la maintenance d'hélicoptères.

Outre la conformité de la distribution démographique pour assurer la représentativité du test, il est à noter que les 34 opérateurs ayant participé à cette étude ont des expériences diverses, allant de 8 à 31 ans d'expérience en tant qu'opérateur de maintenance (moyenne : 15,8, écart type : 7,0). Cette distribution couvre un large éventail d'expériences et est considérée comme une population représentative d'opérateurs de maintenance sur la base de données industrielles.

Détection du dommage

Les résultats concernant la détection de dommages sur les roulements à billes des plateaux cycliques ont été recueillis et résumés dans le graphique ci-dessous (Figure 17). Les résultats montrent que les ensembles de plateaux cycliques n°3 et n°4 avec roulements à billes endommagés ont toujours été détectés (100% des points de test sur les roulements à billes de plateaux cycliques endommagés étaient positifs pour la détection d'endommagement lors du test fonctionnel) par tous les opérateurs de maintenance, quel que soit leur âge, expérience, affectation actuelle d'hélicoptère.

Pour les ensembles de plateaux cycliques n°1 et n°2 sans dommage, en moyenne 25% de détections ont été positives lors des tests fonctionnels. Pour comparer la probabilité de détecter des dommages sur les plateaux cycliques n°1 et n°2 sans dommage et tous groupes confondus, l'Analyse de Variance (ANOVA) à un facteur ne montre pas de résultat significatif (p-value>0.05) entre chaque groupe d'opérateurs n°1, 2 ou 3, par conséquent il n'y a pas de différence significative montrant que ce conservatisme dans la détection ou "sur-détection" pourrait être attribué à l'expérience des opérateurs.

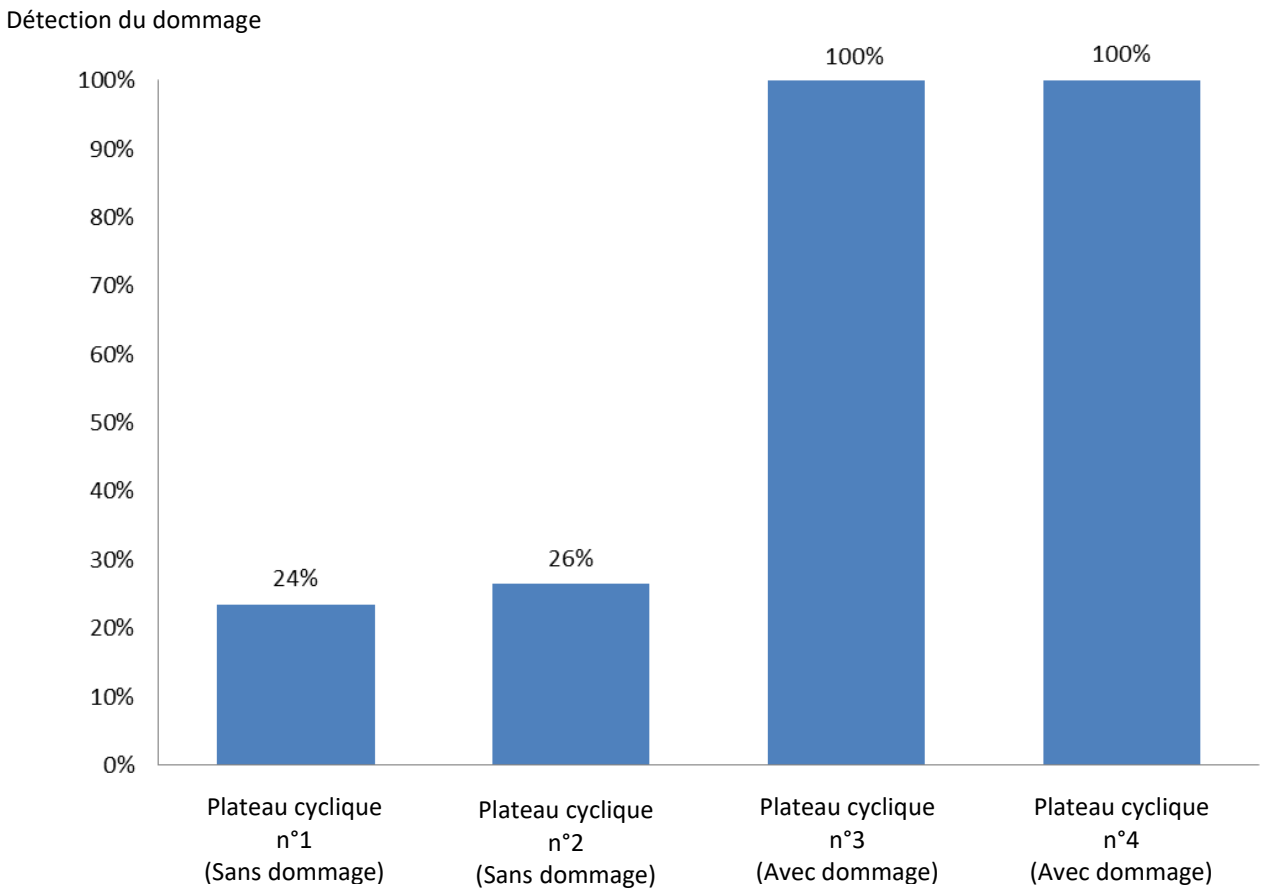


Figure 17: Pourcentage de détection des dommages, tous opérateurs confondus.

Cependant, il est considéré que ce conservatisme dans la détection sur les roulements sans endommagement est en partie dû aux conditions d'essai, qui ont été spécifiées avec des roulements à billes neufs entièrement re-graissés juste avant l'essai. Dans ces conditions, les roulements à billes des plateaux cycliques, pleins de graisse, peuvent être légèrement plus durs à tourner, ce qui peut réduire la sensibilité, mais peut potentiellement être interprété de façon conservatrice comme anormale par un opérateur, et donc conduire à une détection positive. Par expérience, il est reconnu que les roulements à billes sont moins difficiles à tourner manuellement après quelques heures de vol et le mélange de graisse dans le roulement à billes. Plus le roulement à billes des plateaux cycliques peut être tourné facilement, meilleure est la sensibilité de perception des dommages, et plus la sur-détection est faible en raison de la difficulté relative du mouvement de rotation.

En parallèle de ce test, les remarques des opérateurs ont été recueillies pour fournir un meilleur retour d'expérience, et ont permis d'établir les analyses suivantes :

- Tous les opérateurs interrogés ont mentionné qu'il n'y a aucun doute possible sur la détection sur les roulements à billes des plateaux cycliques avec des dommages ;
- Les opérateurs ont clairement détaillé l'endommagement en termes de description (perception du relief, entaille, rugosité, …) montrant que la sensation de perception est évidente ;

- Les opérateurs sans expérience ne connaissaient pas le ressenti des dommages car ils n'avaient aucune comparaison préalable. Cependant, les plateaux cycliques endommagés ont été détectés à 100 % ;
- Même avec une population provenant de divers hélicoptères, avec diverses expériences, les dommages sont toujours détectés sans aucun doute.

Afin d'aider les futurs opérateurs à réaliser cette tâche de maintenance, il a été décidé de générer deux recommandations majeures. La première portant sur l'amélioration de la procédure écrite et la deuxième sur la création d'une vidéo, ne se substituant pas à la procédure écrite, mais permettant de mettre en avant les bons gestes, les bonnes postures pour assurer la meilleure détection possible d'un dommage ou défaut.

4.2.3. Conclusion de l'étude

Sur la base des résultats et analyses détaillés, tous les roulements à billes de plateaux cycliques endommagés ont été correctement détectés, quel que soit le niveau d'expérience, de qualification et de parcours professionnel des opérateurs, ce qui démontre la validité et la robustesse de la tâche d'inspection étudiée. Nous avons constaté que la détection est conservatrice sur des roulements à billes de plateaux cycliques neufs qui viennent d'être graissés, ce qui n'est pas préjudiciable en termes de sécurité. Afin d'améliorer le taux de détection, la compréhension des comportements a permis de proposer des améliorations dans la procédure écrite avec l'appui d'une vidéo pour bien comprendre les gestes et postures à adopter pour ressentir au mieux les défauts dans les roulements.

A travers ces deux exemples d'analyses –qui ne sont pas exhaustifs tant la variabilité est grande dans ce domaine– nous avons montré la nécessité de mieux analyser le travail réel pour mieux comprendre la pénibilité des opérations de maintenance qui engagent la dimension physique, cognitive et/ou organisationnelle de chaque opérateur. Le retour d'expérience est donc essentiel à des fins de mieux concevoir les procédures et l'architecture du produit.

Néanmoins, à travers ces exemples, la notion d'erreurs humaines a été peu évoquée. Ces exemples appuient le chapitre II, c'est-à-dire qu'ils confirment la nécessité de comprendre l'activité en maintenance pour capitaliser et mieux concevoir les futures maintenances, mais se concentrent sur des aspects physiques, de santé et de sécurité. La partie qui suit vise ainsi à décrire un projet mené sur plusieurs années qui vise spécifiquement à capitaliser sur les erreurs humaines pendant l'activité de maintenance.

4.3. Analyses des erreurs humaines en maintenance

4.3.1. Contexte et étude

Afin de capitaliser sur les erreurs humaines, notre industriel, avec les travaux de recherche menés dans le département, a décidé en 2017 de lancer une campagne d'analyses sur des tâches de maintenance existantes sur un certain type d'hélicoptère (Super Puma). Un hélicoptère comptant des milliers de tâches, seules celles dites sensibles ont été sélectionnées. Nous définissons les tâches sensibles par celles impactant des pièces sensibles qui ne tolèrent aucun dommage. Si ces pièces venaient à être défaillantes en vol, il y aurait un risque élevé d'évènements. Ainsi, aucune erreur de

maintenance ne peut être tolérée sur ces pièces, que cela touche des inspections visuelles ou des actions plus lourdes comme des démontages et des remontages.

Ces études sont réalisées suivant la méthodologie HHA (Human Hazard Analysis), directement sur hélicoptères ou à travers des outils de simulations digitaux comme la réalité virtuelle. Pour chaque observation, il y a toujours des opérateurs de maintenance qui réalisent les tâches de maintenance, quel que soit le support de simulation. Initialement, la HHA a été développé comme un outil de gestion des erreurs humaines dans la maintenance, les opérations et la production des voilures fixes ou avions (Gill, 2009). Cette méthodologie a été utilisée sous une forme légèrement modifiée dans notre cadre industriel et adaptée à l'industrie des hélicoptères qui imposent quelques différences avec la maintenance des avions. Elle a été spécifiquement adaptée à la gestion des erreurs humaines dans le domaine de la conception, de la maintenance et de l'exploitation des avions et des hélicoptères. La méthodologie adoptée pour les hélicoptères reprend les aspects traditionnels du processus d'évaluation de la sécurité des aéronefs, en particulier l'analyse de l'arbre de défaillance, et les associe à une notation tabulaire structurée appelée Analyse des Modes et des Effets de l'Erreur Humaine (ou « HEMEA » en anglais). La HEMEA fournit des données, obtenues à partir du domaine de connaissances, de l'expérience en service et des modes d'erreurs connus, sur les événements probables influencés par l'EFH. Les observations sont ainsi menées par des spécialistes en EFH du département maintenabilité pour être restituées, après analyses des résultats, à des non spécialistes (Gill, 2019 ; HeliOffshore, 2021). Cela induit, pendant l'analyse, l'usage des outils de l'ergonome, ainsi que PEAM (Preliminary Ergonomics Assessment in Maintainability) et le CSR (Contraintes Stratégie Ressources) évoqués en chapitre I peuvent aussi être exploités. A la fin de l'analyse, le rapport diffusé auprès de tous les acteurs-métiers du bureau d'études montrera uniquement une matrice des risques. Le HHA permet en effet de compléter une matrice globale des risques (Cox, 2008) dissociant la probabilité qu'une erreur se produise, l'impact pour l'opérateur et l'impact pour l'hélicoptère en termes de navigabilité (ex : Dommage conduisant à une situation catastrophique en vol). Cette échelle exprime un score de 1 à 5, 1 étant un risque d'erreur quasi nul et 5 un risque très fort, aussi bien en termes d'occurrence que de gravité. La matrice des risques est détaillée dans la Figure 18.

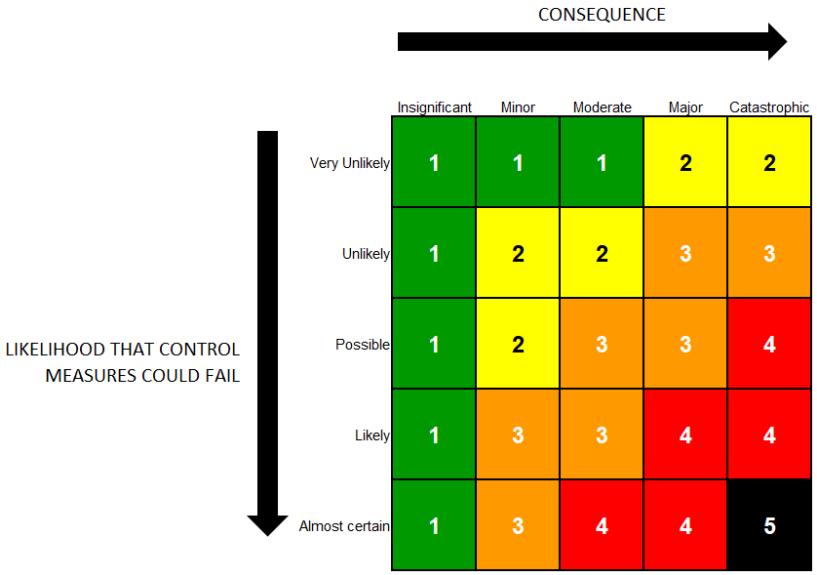


Figure 18: Matrice des risques de Cox utilisée dans la méthode HHA pour évaluer les risques de chaque tâche de maintenance, 2008.

Cette matrice et ce processus global ont été revus par HeliOffshore (association regroupant la majorité des compagnies d'hélicoptères « offshore ») qui agit en tant qu'organisation neutre, pour renforcer la sécurité opérationnelle dans l'industrie des hélicoptères. Elle permet aussi de rassembler des acteurs tels que les opérateurs et les fabricants. L'utilisation de ce processus et de cette matrice est vue, par l'association et les industriels, comme efficace car adaptée aux non-spécialistes en EFH du bureau d'études. En effet, les rapports de toutes les analyses EFH des activités de maintenance montrent uniquement le score global de la matrice des risques, détaillant l'erreur qualitativement et proposant une recommandation associée. Cette « simplification » permet une bonne compréhension par les non spécialistes en EFH. Dans certains cas où la recommandation émise par l'ergonome est remise en question, l'ergonome peut détailler l'ensemble de l'analyse et des outils qu'il a pu utiliser pour réaliser son analyse EFH.

Nous avons récemment commencé à capitaliser l'ensemble des résultats (Bernard et al., 2023). Dans ce contexte, afin de suivre toutes les analyses et résultats des analyses EFH, nous avons construit une base de données pour résumer et enregistrer les résultats. Les erreurs et les risques sont définis à partir de la littérature (Graeber & Marx, 1993 ; Shanmugam & Robert, 2015). Cette littérature détaille les principales erreurs de maintenance constatées au travers de certaines compagnies aériennes et au travers de l'analyse des accidents aériens (voilure fixe et hélicoptères confondus). Plus de 150 tâches de maintenance et accidents ont été étudiés dans la littérature examinée. Nous proposons dans le tableau 9 suivant toutes les catégories de risques initialement anticipées et leur répartition en pourcentage, sur les 1057 risques déterminés dans nos études et analyses EFH.

Tableau 9: Catégories de risques en maintenance.

Code	Catégories	Répartition (sur les 1057 risques) (en %)	Risques
E1	Travail en Hauteur	12	Risque de chute
E2	Corps étranger	22	Pièces de l'appareil oubliées
E3			Protection / outillage oublié
E4	Assemblage incorrect	5	Action inappropriée (orientation des pièces et geste)
E5			Montage incorrect (couple de serrage)
E6			Action inappropriée (séquence)
E7	Nombre d'opérateurs	4	Action inappropriée
E8	Prévention des dommages	5	Action inappropriée
E9	Identification des dommages / Inspection incorrecte	24	Action inappropriée (Critère des dommages)
E10			Action inappropriée (Moyen de mesure et de détection des dommages)
E11	Méthodologie	6	Action inappropriée
E12	Illustration	13	Action inappropriée (point de vue de l'opérateur)
E13			Action inappropriée (représentation de l'environnement global)
E14	Inspection indépendante	9	Risque d'oubli d'une sous-tâche

La recommandation associée à chaque erreur a été choisie grâce à un groupe de travail composé de différents intervenants des bureaux d'études et du service procédure de maintenance. Ces parties prenantes sont toutes impactées par les recommandations proposées à la fin de l'analyse EFH. Toutes les recommandations adressées sont réparties en quatre catégories :

- C1 : changement de conception, pour améliorer une conception existante et rendre les tâches de maintenance plus sûres pour les opérateurs.
- C2 : amélioration de l'outil de maintenance pour aider l'opérateur à effectuer la tâche facilement et de la manière la plus fiable,
- C3 : amélioration de la procédure de maintenance (séquences, illustrations, etc.) en relation avec le spécialiste Facteurs Humains de ce service,
- C4 : amélioration de la formation de Maintenance, pour insister sur les erreurs les plus couramment constatées.

4.3.2. Conclusion de l'étude

Dans notre étude (Bernard et al., 2023), les catégories de risques déterminées lors de l'analyse EFH sont conformes à la littérature (Graeber & Marx, 1993 ; Shanmugam & Robert, 2015), bien que la majeure partie de la littérature soit centrée sur les avions alors que notre analyse est exclusivement orientée sur les hélicoptères.

Cette première analyse, réalisée sur un seul type d'hélicoptère (Airbus Helicopters H225), montre que le risque le plus fréquent est lié à une mauvaise inspection et aux corps étrangers. Toutes les recommandations associées concernent une ou plusieurs catégories de conception, d'outil de maintenance, de procédure et de formation. Ce travail d'analyse avec le HHA a aussi commencé sur d'autres appareils d'Airbus, tels que le H175 et le H160. En capitalisant davantage, il pourrait être intéressant d'analyser statiquement la répartition des erreurs selon le système de l'hélicoptère (rotor principal, rotor de queue, commandes de vol, hydraulique, suspension, etc.) et le type d'hélicoptère. La même approche pourrait également être utilisée pour les types de recommandations formulés au cours de l'analyse. Cette nouvelle étude permettrait d'améliorer le référentiel d'erreurs et les recommandations associées. Ces recommandations pourraient ainsi mieux orienter les acteurs-métiers du bureau d'études qui pourront appréhender l'activité future et les risques pour les opérateurs de maintenance.

Ces analyses de situations de travail sont relativement récentes, ne sont pas aujourd'hui systématisées et ne concernent que certaines tâches de maintenance jugées sensibles. Néanmoins, en aéronautique, il existe un autre type de retour d'expérience, souvent très bien documenté, l'analyse d'incidents et d'accidents, qui peut aussi être vu comme une source de retour d'expérience très riche. La suite de ce chapitre va ainsi traiter cette thématique.

5. L'analyse d'incidents/d'accidents

5.1. Généralités

La communauté scientifique met en avant deux courants principaux s'intéressant à l'EFH en maintenance. Plus précisément, certains auteurs s'interrogent sur les conditions de travail des opérateurs de maintenance (Chang et al., 2010), et sur les enjeux en termes de santé des opérateurs. C'est principalement l'axe étudié dans nos études depuis de nombreuses années (Bernard, 2019 ; Bernard et al., 2021). D'autres travaux se focalisent sur l'étude des erreurs humaines en maintenance (Shanmugam & Paul Robert, Murie, 2022). Ce deuxième axe semble essentiel à étudier pour assurer notre objectif qui est de mieux comprendre les activités de maintenance à des fins de mieux les concevoir. Nous avons, dans ce cadre, réalisé des travaux au travers de la thèse de Camille Murie, en 2022, toujours au sein de notre industriel aéronautique (Cf Chapitre II). Si ces travaux se centrent dans l'approche proactive (de la maintenabilité vers la maintenance), il est essentiel de traiter également l'erreur humaine en maintenance dans l'approche rétroactive. L'analyse d'incidents/d'accidents en est le principal vecteur.

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 à des accidents. L'amélioration des techniques d'analyses après un 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 identifié des erreurs humaines comme l'omission, les installations incorrectes ou encore de mauvaises pièces montées (Latorella, 2000). D'autres études ont précisé que 34% des tâches routinières sont réalisées sans conformité (McDonald et al., 2000) et 64% des opérateurs ne suivent pas les consignes (c'est-à-dire avec un écart par rapport au prescrit), les normes et les recommandations mais travaillent surtout par expérience (Chaparro et al., 2004 ; Tricot, 2009). Certaines études ont même montré qu'un opérateur génère entre 3 à 6 erreurs par heure, pouvant atteindre 50 erreurs observables par journée de travail (Reason & Hobbs, 2017). Cette même étude indique que 80% des erreurs sont détectées et corrigées par l'opérateur lui-même, les 20% restant pouvant être classés en erreurs latentes. 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 ainsi un terrain favorable à la production d'erreurs. Plusieurs études ont identifié les erreurs humaines les plus communes avec effets immédiats dans la maintenance aéronautique. En particulier, 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.

Face à ces statistiques, la réglementation internationale a évolué au cours du temps et l'Organisation Internationale de l'Aviation Civile a encadré d'un point de vue réglementaire les investigations d'accidents. Nous retrouvons notamment les informations dans l'Annexe 13 de cette organisation, intitulée « Enquête sur les accidents et incidents d'aviation ». L'objectif affiché de l'enquête sur les accidents est de prévenir de futurs incidents et accidents, sans blâmer le ou les opérateurs. Nous pouvons également citer l'Annexe 19 « Gestion de la sécurité » cadrant la gestion de la sécurité autour du « Système de Management de la Sécurité » (SMS ou « Safety Management System ») au sein de chaque organisation aéronautique (constructeurs, compagnies aériennes ou encore les centres de maintenance). L'objectif étant ici de prévenir, sensibiliser sur la sécurité autour de quatre piliers afin d'éviter l'accident (et donc d'enclencher l'annexe 13 de l'OACI) :

1. Politiques et objectifs de la sécurité,
2. Gestion des risques de sécurité,
3. Garantie de sécurité,
4. Promotion de la sécurité.

Il est d'ailleurs intéressant de voir que l'autorité européenne de sécurité aérienne, EASA (European Union Aviation Safety Agency) a publié la priorité des stratégies (EPAS) qui stipule dans le paragraphe 3.1.3 intitulé, p. 35, « Gérer les facteurs humains et la performance humaine » : « L'accent mis sur les Facteurs Humains et la performance humaine devrait faire partie intégrante de toute approche de gestion de la sécurité, que ce soit au niveau régional, national ou industriel, il est donc maintenu comme une priorité stratégique de l'EPAS ». Autrement dit, les autorités appuient largement le fait que tout travail autour de la notion de sécurité doit impérativement intégrer la notion d'EFH. Ceci induit aussi l'implication de spécialistes EFH.

Ainsi, en accord avec la réglementation :

- L'annexe 19 de l'OACI engageant le déploiement du SMS, doit tenir compte de l'EFH. Ce que nous proposons en chapitre II et dans la première partie du chapitre III rentre parfaitement dans cette logique : mieux intégrer l'EFH pendant les phases de conception pour la maintenance et analyser scientifiquement les activités de maintenance pour qualifier et quantifier les difficultés vécues par les opérateurs.
- L'annexe 13 de l'OACI qui engage la rigueur à déployer lors des analyses d'incidents et d'accidents.

Pour appuyer la réglementation et mener des investigations ou des analyses de risques à la suite d'accidents aériens, il existe de nombreux modèles. Nous proposons dans la partie qui suit d'en présenter quelques-uns pour mieux connaître leur philosophie, leur impact et le lien qui peut être fait avec le bureau d'études maintenabilité.

5.2. Des modèles d'analyse existants

Pour comprendre l'origine des erreurs humaines 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) (O'Connor & Hardiman, 2017), « Model of latent and Active Failure » or « Swiss cheese slices model » (Reason, 1990), "Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach » (SHERPA) (Embrey, 2015) ou encore la méthode « Sofware, Hardware, Environment, Liveware » (SHELL) (Hawkins & Orlady, 1993).

Nous proposons de détailler quelques outils parmi la liste non exhaustive ci-dessus. Nous nous focaliserons notamment sur deux outils particulièrement intéressants dans notre cas car très utilisés dans le monde aéronautique et en particulier en maintenabilité (Allen & Rankin, 1995 ; Shappell & Wiegman, 2000).

5.2.1. Aide à la décision en cas d'erreur de maintenance (MEDA ou « Maintenance Error Decision Aid »)

Depuis 1995, Boeing propose un outil d'aide à l'analyse de l'EFH appelé Maintenance Error Decision Aid (MEDA) pour enquêter sur les facteurs contributifs aux erreurs de maintenance (Allen & Rankin, 1995). Boeing a récemment élargi la portée de cet outil pour inclure non seulement les erreurs de maintenance, mais également les violations des politiques, processus et procédures de l'entreprise qui conduisent à un résultat indésirable. Le modèle du MEDA est dit « classique » avec un arbre des causes permettant d'identifier les facteurs contributeurs amenant à l'erreur puis à l'évènement. La notion de probabilité d'occurrence est également à déterminer. La Figure 19 montre le modèle conceptuel du MEDA.

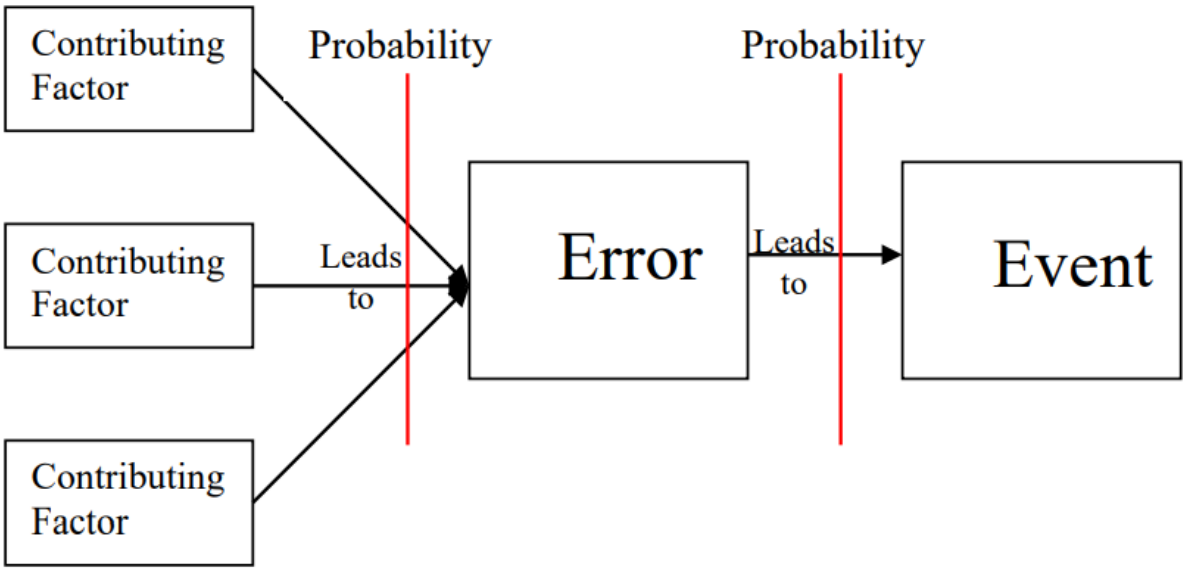


Figure 19: Modèle conceptuel du MEDA.

Pour déterminer chaque facteur contributeur, le MEDA se compose en une succession de check-lists permettant à l'investigateur de venir sélectionner des facteurs contributeurs qu'il identifie au travers de ses observations et des interviews. Il existe quatre thématiques composées d'une taxonomie dédiée, détaillée en Figure 20.

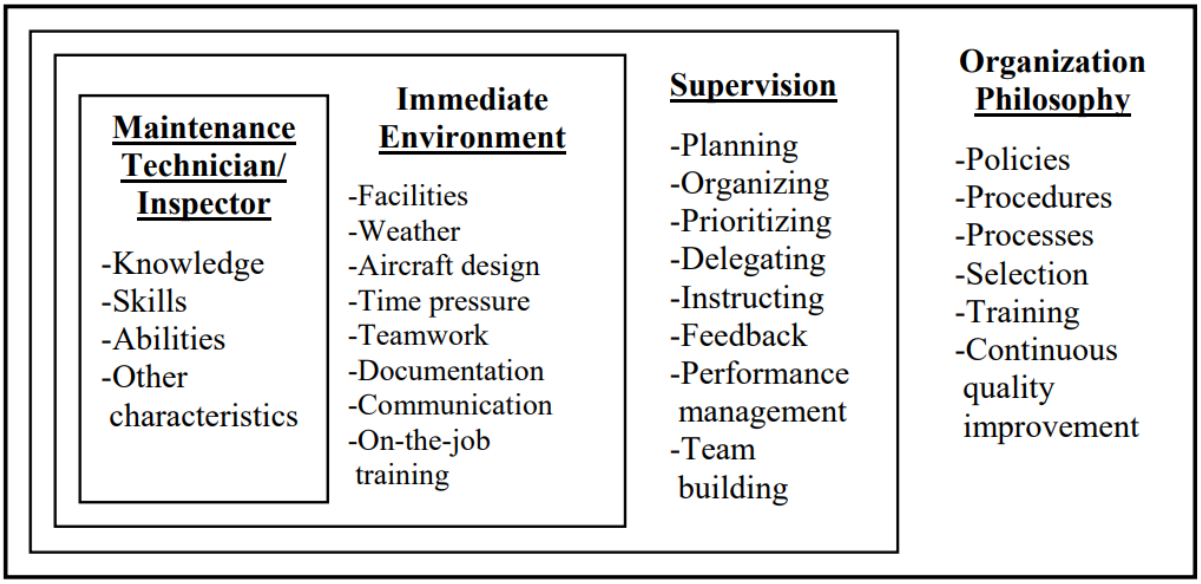


Figure 20: Catégories et taxonomies associées pour remplir la check-list MEDA.

Une fois les grands critères sélectionnés pour chaque catégorie, l'investigateur doit réaliser un diagnostic analytique en faisant le lien entre chaque facteur contributeur. Grâce à la check-list, l'investigateur peut, en allant sur le terrain et en réalisant des interviews, déterminer les principaux enchaînements d'un évènement. C'est ensuite à l'investigateur et à son équipe de déterminer les voies d'amélioration, les solutions pour éviter que ce type d'évènement ne se reproduise.

5.2.2. Système d'analyse et de classification des facteurs humains (HFACS ou « Human Factors Analysis and Classification System »)

Cette méthode va plus loin que le MEDA et se base sur un constat plus large autour des investigations accidents. Elle peut d'ailleurs être considérée comme une démarche systémique composée de différents outils, permettant une analyse de l'activité au sens EFH. La plupart des événements indésirables, qu'il s'agisse d'accidents, d'incidents ou d'accidents évités de justesse, sont attribuables à une erreur humaine. Les erreurs sont des occasions dans lesquelles une séquence planifiée d'activités cognitives ou physiques ne parvient pas au résultat escompté (Amalberti & Wioland, 2020). Par conséquent, toute analyse des causes profondes (RCA ou « Root Cause Analysis ») d'un événement indésirable ne peut être considérée comme « approfondie et crédible » à moins qu'elle n'examine efficacement l'EFH qui sous-tend les erreurs qui ont causé un événement indésirable.

Les méthodes RCA actuelles, qui sont maintenant mandatées par de nombreuses organisations, n'ont pas été conçues pour identifier les causes d'erreurs liées à l'EFH. Au contraire, le RCA est une méthode d'ingénierie conçue pour découvrir les causes sous-jacentes des équipements et des défaillances matérielles comme le ferait un AMDEC (Hurtrel et al., 2012). Ainsi, lorsque les méthodes RCA sont utilisées pour analyser l'EFH, elles produisent généralement des résultats superficiels, se concentrant souvent sur « qui a fait quoi ? » plutôt que sur « pourquoi ? » une erreur s'est produite. Nous observons ainsi un paradoxe soulevant un problème de sécurité important. Des préoccupations majeures existent concernant la capacité des méthodes RCA traditionnelles à identifier les problèmes d'EFH ou à générer des solutions correctives efficaces à ces problèmes. Pour que les systèmes deviennent plus sûrs, un processus plus « approfondi et crédible » pour analyser et corriger les causes les plus courantes d'erreurs et d'événements indésirables (c'est-à-dire l'EFH) doit être déployé. C'est au travers de cette philosophie que le système d'analyse et de classification des facteurs humains (HFACS ou « Human Factors Analysis and Classification System ») a été conçu pour répondre à ce besoin critique. HFACS est une méthodologie innovante pour effectuer une analyse complète d'EFH autour d'événements associés à l'erreur humaine.

La méthode HFACS (Shappell & Wiegman, 2000) a été développée à l'origine par le Dr. Scott Shappell et le Dr. Doug Wiegmann pour faciliter l'analyse de l'EFH associée aux accidents aériens, notamment dans l'US Air Force dans les années 1990. Elle est basée sur le modèle de causalité des accidents « Swiss Cheese » de Reason, 1990, qui conceptualise l'erreur humaine comme le produit d'interactions complexes entre une multitude de variables systémiques latentes et actives. HFACS traduit la théorie de Reason en pratique via un cadre ou un outil pragmatique qui guide systématiquement l'analyse des données sur l'EFH associée aux événements indésirables. Depuis son développement initial pour l'aviation, HFACS a été appliqué avec succès dans une variété d'industries à haut risque comme le ferroviaire, la chimie ou encore le maritime (Zhan et al., 2017 ; Wang et al., 2020 ; Kaptan et al., 2021), mais également dans l'industrie de la santé (Diller et al., 2014 ; Cohen et al., 2018). Des études ont montré que HFACS est un outil d'analyse fiable qui peut conduire à des actions correctives efficaces pour réduire la récurrence des événements indésirables (Lenné et al., 2012 ; Wiegmann et al., 2021).

Le HFACS se compose de quatre grandes catégories de facteurs connus contribuant aux erreurs et aux accidents. Il s'agit notamment des actes dangereux, des conditions préalables aux actes dangereux, des facteurs de surveillance et des influences organisationnelles. Lorsqu'une enquête RCA examine en

profondeur les facteurs potentiels de causalité et contributifs à chacun de ces niveaux, à l'aide de la méthode HFACS, un plus grand nombre et une plus grande variété de problèmes seront soulevés, ce qui permettra de développer des stratégies d'intervention plus efficaces. HFACS transforme la méthode RCA traditionnelle en un outil efficace d'enquête.

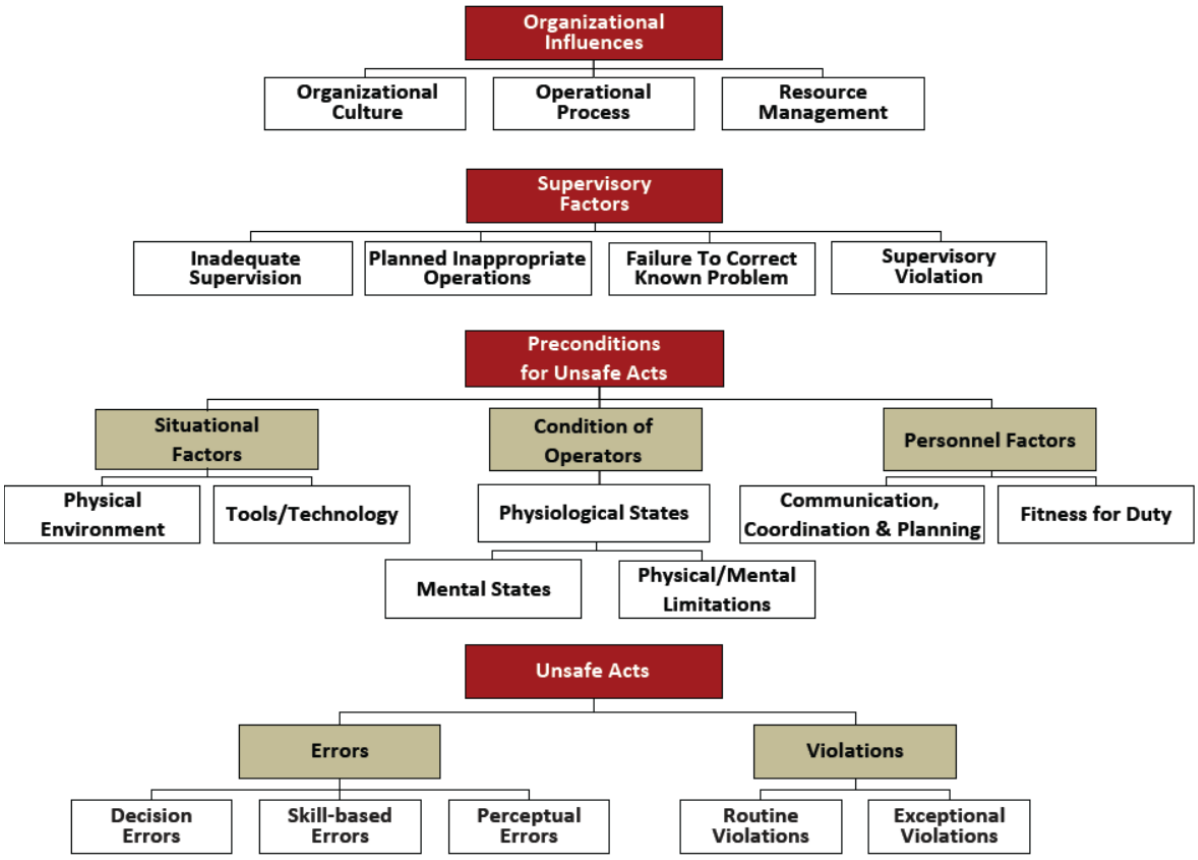


Figure 21: Etapes composant le processus d'analyse d'évènements HFACS.

Deux types de taxonomie ont été développés pour le secteur aéronautique. La première touche des évènements ayant pour causes principales l'activité dite opérationnelle et la seconde, l'activité de maintenance. C'est cette deuxième catégorie qui nous intéresse tout particulièrement.

Depuis les années 2000, le HFACS s'est dotée d'une extension de maintenance, appelé HFACS-ME (pour « Maintenance Extension »). Des études ont montré l'efficacité de la méthode dans un contexte de maintenance (Illankoo, et al., 2019). On retrouve, pour chaque catégorie évoquée en Figure 21, une taxonomie dédiée permettant, assez rapidement, d'identifier les facteurs contributeurs majeurs. La taxonomie est ici similaire à celle retrouvée dans le MEDA, certains industriels ayant même importé celle du MEDA pour compléter la liste du HFACS.

De plus, la méthode HFACS s'est enrichie avec le temps avec notamment l'apparition d'une matrice d'intervention de l'EFH, appelé HFIX (« Human Factors Intervention Matrix ») permettant de proposer des solutions innovantes et de les évaluer. Pour faciliter l'usage du HFIX, nous retrouvons une succession de check-list soulevant des questionnements, autour de cinq thématiques :

- Environnement,
- Tâche,
- Technologie,
- Individualité / équipe,
- Supervision / organisation.

Et il est intéressant de voir que chaque solution technique peut être ensuite évaluée et quantifiée suivant le processus appelé FACES :

- Faisabilité (« Faisability »),
- Acceptabilité (« Accetability »),
- Coût/Bénéfice (« Cost/Benefit »),
- Efficacité (« Effectiveness »),
- Durabilité (« Sustainability »).

5.3. Conclusion de l'étude

Tous les modèles d'analyses d'accidents, comme le MEDA ou le HFACS – le constat est similaire à la plupart des modèles existants – 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 être influencée par les conditions de travail d'un opérateur de maintenance, à sa sécurité et à sa santé. La question qui peut ainsi être soulevée est le niveau de connaissance en EFH des utilisateurs de ces méthodes. En effet, même si la plupart de ces modèles ont la vertu d'être construit pour être utilisé facilement, sans connaissances en EFH préalables, ils n'incitent pas à avoir une vue holistique d'une situation de travail et de voir plus loin que les seuls critères proposés par le modèle. Ils ne facilitent donc pas la compréhension de l'EFH par les non spécialistes en EFH.

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 ainsi que celles concernant les erreurs humaines. En accord avec nos travaux actuels, il semble essentiel de s'intéresser à :

- L'anticipation et la compréhension des erreurs, et notamment par la voie de la simulation de l'activité ;
- L'intégration dans les analyses d'évènements des notions de santé et de sécurité, notamment pour aider les non spécialistes en EFH.

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 devraient donc continuer à se focaliser sur l'anticipation des conditions de travail, incluant la santé et la sécurité des opérateurs. Une meilleure anticipation des conditions de travail (améliorer l'accessibilité, l'organisation, les outillages etc) peut contribuer à réduire les erreurs humaines et à améliorer la compréhension du risque. Et avoir conscience des risques est aussi en soi une voie réaliste vers l'amélioration de la sécurité.

6. Synthèse et perspectives

6.1. Diagnostic global

La thèse de doctorat menée entre 2016 et 2019 a été un premier pas pour intégrer l'EFH dans les phases de conception dédiées à la maintenance (approche proactive). Des perspectives y avaient été établies, notamment sur la nécessité de se pencher sur les retours d'expériences, notamment au travers de l'analyse d'évènements, comme les incidents ou les accidents aériens. Les travaux de recherche qui se sont poursuivis ont ainsi permis d'approfondir certaines de ces questions mais également d'en travailler de nouvelles. Notamment au travers de la thèse de Camille Murie, 2022, ayant pour objectif, entre autres, d'anticiper les erreurs de maintenance pendant les phases de conception en se basant sur des retours d'expériences, comme évoqué en chapitre II.

Ainsi, en phase rétroactive, c'est-à-dire en amenant du retour d'expérience directement de la maintenance (terrain) vers la maintenabilité (bureau d'études), il apparaît deux axes majeurs.

- Etudier et mieux comprendre la variabilité du terrain : les difficultés avérées de l'activité de maintenance (Chang et Wang, 2010 ; Latorella et Prabhu, 2017) devraient pouvoir servir à mieux concevoir la future maintenance. Or, la variabilité des activités de maintenance est encore aujourd'hui mal comprise et pas toujours étudiée en profondeur. Les expérimentations menées au sein de notre industriel (Bernard et al., 2021, Bernard et al., 2023) ont mis en avant que certaines tâches de maintenance simples (courtes, sans difficulté physique) pouvaient devenir pénibles et générer des erreurs humaines dues à l'enchainement préalable d'une succession de tâches difficiles. Ce constat amène à un double enjeu :
    - (1) mieux comprendre l'activité de l'opérateur à des fins de mieux concevoir. Les études détaillées de terrain doivent se poursuivre car elles permettent de mieux faire comprendre aux ingénieurs-concepteurs en bureau d'études l'impact d'une conception non adaptée à l'opérateur (Thibault et al., 2013 ; Lux et al., 2016 ; Hoyos-Ruiz et al., 2017). Avoir des exemples étayés et concrets alimente la dimension pédagogique qu'il faut promouvoir pour mieux faire redescendre au sein des bureaux d'études une partie des contraintes des opérateurs, notamment les paramètres ayant une influence sur l'activité des opérateurs (Lu et al., 2011 ; Kelly & Efthymiou, 2019). Une partie des contraintes, car les analyses EFH réalisées au fil de l'eau, ne se veulent pas exhaustives en termes de contraintes subies, notamment certaines qui ne sont uniquement révélées que lors d'évènements, c'est-à-dire à la suite d'incidents ou d'accidents.
    - (2) organiser différemment l'activité de maintenance. Sur ce deuxième point, cela ne touche pas directement la maintenabilité puisque l'organisation de la maintenance dépend de chaque client, de chaque pays qui possède ses propres règles et de chaque culture de la sécurité. Néanmoins, des travaux montrent un changement de comportement dans certains bureaux d'études orientés sur la conception de postes de travail pour la maintenance, tous secteurs confondus avec une prise de conscience clairement établie : 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 (Thibault et al., 2013 ; Lux et al., 2016 ; Hoyos-Ruiz et al., 2017). Cependant, en aéronautique, le poste de travail est changeant, pour un même opérateur, puisque la zone de travail peut se situer partout, en dehors ou dans l'hélicoptère. C'est pourquoi nous parlons davantage de conception de l'activité de maintenance, qui fait appel à plusieurs postes de travail, à des procédures différentes, des outillages différents… Cette configuration devra davantage s'appuyer sur des données objectives telles que celles touchant la charge physique et cognitive.

Dans les deux cas, l'objectivité des études doit pouvoir être mieux exprimée auprès des ingénieurs-concepteurs, sous forme, par exemple, d'un travail de pédagogie et de formations. Ce travail doit être conduit sous l'aval d'un spécialiste en EFH, présent au sein même du bureau d'études pour diffuser, guider et contrôler le savoir et savoir-faire en EFH. La formation doit apporter aux ingénieurs-concepteurs des notions touchant le fonctionnement humain et l'activité de travail. Cette formation, voire cette sensibilisation des ingénieurs-concepteurs, ne doit pas se substituer à l'expertise du spécialiste en EFH. L'ingénieur-concepteur aura en revanche la capacité de faire des choix conceptuels qui ont du sens pour le futur opérateur et saura prendre la décision de faire appel à un spécialiste en EFH pour rentrer dans le détail. Cet accompagnement est à conduire pour convaincre de l'utilité de l'approche de l'EFH au sein des bureaux d'études. D'ailleurs, des recherches ont estimé que l'analyse de l'EFH est 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 EFH sur la base de règles métiers communes (Martin & Baradat, 2003).

- Participer aux enquêtes d'évènements (incidents / accidents) : dans les perspectives initiales de nos travaux (Bernard, 2019), nous avons évoqué la nécessité de s'intéresser aux analyses d'évènements, très souvent documentés puisqu'ils font suite à des enquêtes officielles par les autorités nationales et/ou internationales (BEA – Bureau d'Enquêtes et d'Accidents en France ; NTSB – National Transportation Safety Board pour les Etats-Unis d'Amérique). Sur ce point, nous nous sommes depuis penchés sur des outils d'analyse d'incidents et d'accidents, tels que HFACS (Shappell & Wiegmann, 2001) ou MEDA (Allen & Rankin, 1995). Néanmoins, comme d'autres outils analogues, le constat montre que ces outils ne traitent pas forcément les évènements d'un point de vue holistique en s'attardant particulièrement sur les erreurs humaines, et qu'ils s'intéressent plus rarement aux conditions de travail, à la sécurité et à la santé / caractéristiques individuelles des opérateurs. Sans connaissances spécifiques en EFH, l'usage unique de ces outils peut être assez réducteur au regard de l'activité globale de la maintenance et du contexte ayant amené à un évènement. Même si dans le cadre d'évènements (incidents ou accidents), un collectif de spécialistes est toujours constitué et peut parfois inclure un spécialiste en EFH, ce dernier arrive tardivement. En effet, le spécialiste en EFH intervient souvent après l'usage des outils d'analyses, induisant que des conclusions soient déjà extraites.

6.2. Voies d'amélioration pour mieux comprendre la variabilité de l'activité de maintenance

Ce chapitre nous a amené à poser plusieurs réflexions sur l'intérêt de mieux comprendre la variabilité du travail pendant l'activité de maintenance, mais également de se pencher davantage sur l'analyse et les enquêtes liées à des évènements, qu'ils touchent les incidents ou les accidents.

En vue d'améliorer la conception de la maintenance, plusieurs pistes peuvent être évoquées pour nourrir les travaux de recherche futurs et seront développées en chapitre V :

- Une même tâche de maintenance peut être réalisée de manière différente suivant le pays, la culture, la formation, les caractéristiques de l'opérateur, l'environnement de travail, l'organisation etc. Etudier cette variabilité pourrait permettre de créer un référentiel pour les ingénieurs-concepteurs afin d'optimiser la maintenabilité.
- Systématiser le retour d'expérience des opérateurs de maintenance en les incitant à mieux faire remonter leurs doléances et les points positifs. Cela induit, d'une part une sensibilisation des opérateurs à verbaliser, à leur donner des moyens pour capitaliser objectivement, rapidement et facilement ce qu'ils vivent dans leur travail quotidien et d'autre part, construire une organisation côté industrie pour traiter et comprendre ces retours d'expériences tout en les traduisant sous forme de recommandations pour le bureau d'études.
- Les outils d'analyses des évènements doivent être utilisés avec un recul plus fort par le responsable de l'analyse, voire idéalement par un spécialiste en EFH. Cela permettra une vue holistique des conditions de travail et des composantes de l'activité de travail, en s'extirpant de la donnée technique qui parfois apparaît comme le facteur majeur par les non spécialistes en EFH.
- L'ensemble de ces trois voies d'amélioration devrait pouvoir contribuer à capitaliser sur les risques observables lors des activités de maintenance sur hélicoptère, ce qui peut permettre de tendre vers une forme d'exhaustivité des risques potentiels. Ces risques pouvant toucher aussi bien l'intégrité physique de l'opérateur que les erreurs de maintenance pouvant conduire à une défaillance en vol. Pour aller plus loin, nous pourrions imaginer une capitalisation sous forme d'exigences (répondant donc aux risques et aux erreurs observées) à vérifier (check-list, règles…) directement en bureau d'études par l'ensemble des acteurs-métiers.

7. Conclusion

Ce chapitre nous a amené à comprendre l'approche rétroactive couverte par deux axes que sont l'analyse de l'activité des opérateurs de maintenance et l'analyse des incidents / accidents. Plus particulièrement, pour mieux concevoir il est important, avant tout, de comprendre la vie réelle des opérateurs de maintenance. Il est ainsi nécessaire d'étudier, d'analyser la pénibilité des opérateurs afin de les retranscrire en exigences de conception pour les acteurs-métiers du bureau d'études non spécialisés en EFH. En reprenant la Figure 7 (ici rappelée en Figure 22) déjà présentée en conclusion

du chapitre II, nous avions évoqué que la thèse de Camille Murie avait, dans une certaine mesure, commencé à se pencher sur l'axe 1, notamment au travers de la méthode CSR (Contraintes Stratégie Ressources) (Murie, 2022). Néanmoins, nous avons expliqué que ces travaux et la méthode associée avaient surtout pour objectif de mieux faire comprendre aux ingénieurs-concepteurs certains aspects de la vie quotidienne des opérateurs de maintenance, sans pour autant détailler précisément toutes les variabilités de leur travail. Cet axe 1 est donc entièrement étudiées dans l'approche rétroactive permettant une analyse terrain complète.

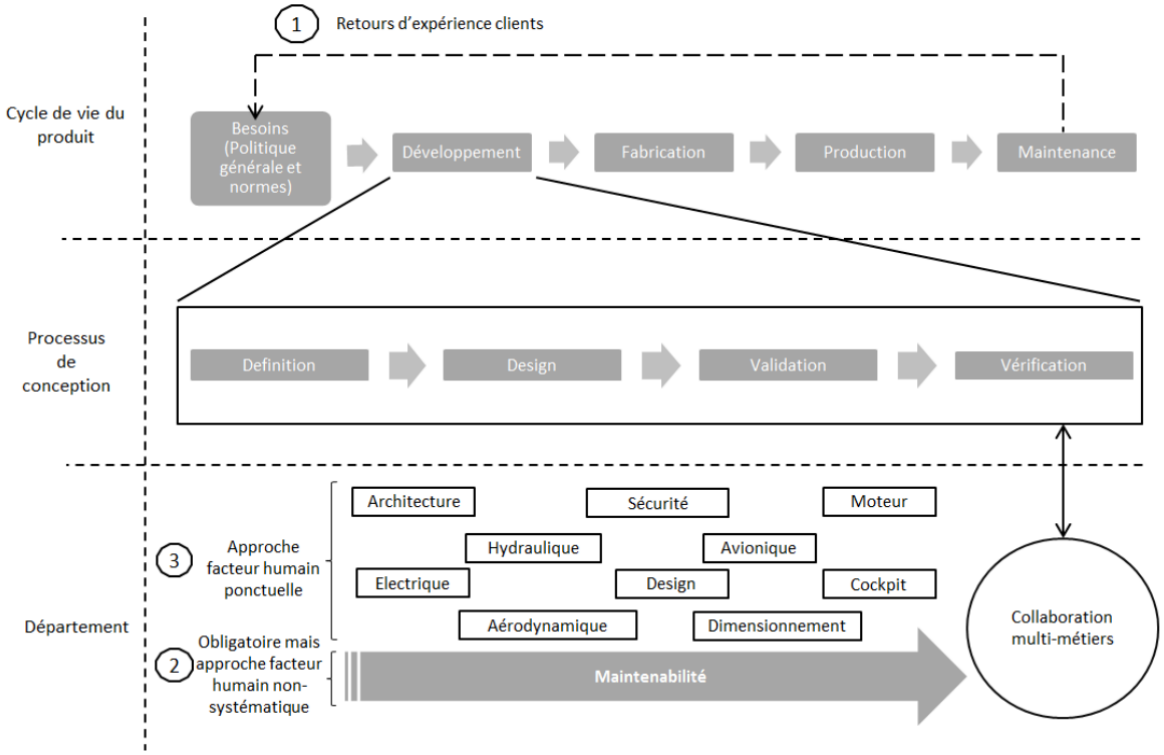


Figure 22: Rappel de la Figure 7 évoquée en conclusion du chapitre II.

Également, l'analyse des incidents et des accidents ayant pour cause racine l'erreur de maintenance doit devenir systématique. Par analogie, nous pouvons évoquer les évènements ayant pour cause racine l'activité dans les cockpits qui, aujourd'hui, enclenche systématiquement des analyses approfondies de l'activité, souvent par simulation. Les méthodes et les outils pour analyser les causes racines en maintenance se développent et sont de plus en plus utilisés. Il convient donc de mieux exploiter ces évènements et les analyses associées pour, encore une fois, traduire les recommandations EFH en exigences de conception.

Il y a donc désormais un travail d'articulation à générer pour faire le lien entre ce chapitre III et le chapitre II qui vise directement à mieux concevoir l'activité future de maintenance. Nous pouvons notamment mettre en avant un point commun à ces deux chapitres autour de la simulation de l'activité. En effet, que ce soit sur l'approche proactive ou rétroactive, les outils de simulation digitaux et physiques peuvent être utilisés pour anticiper ou reproduire une activité de maintenance afin de l'étudier et de mieux la comprendre. Nous proposons ainsi un chapitre IV centré autour de ces outils de simulation qui vont permettre de mieux les appréhender et surtout, de comprendre leur efficacité, leur pertinence et leur complémentarité.

CHAPITRE IV

SIMULATION EN AERONAUTIQUE - VECTEUR COMMUN POUR CONCEVOIR ET FORMER

IV. SIMULATION EN AERONAUTIQUE – VECTEUR COMMUN POUR CONCEVOIR ET FORMER

1. Introduction

Les chapitres II et III font apparaitre un vecteur commun dans l'analyse de l'EFH : l'observation de l'activité de maintenance, en particulier autour de la simulation de l'activité. Nos travaux de recherche menés pendant la thèse de doctorat entre 2016 et 2019 (cf chapitre II) ont mis en évidence la pertinence des outils de simulation, qu'ils soient digitaux ou physiques, pour réaliser des analyses EFH pendant les phases de conception dédiées à la maintenabilité. Depuis 2019, les travaux de recherche conduits ont mis en évidence que les outils de simulation jouent un rôle important pour reconstituer des scénarios vécus afin de mieux les comprendre, comme nous avons pu l'entrevoir à travers le chapitre III où des situations de travail existantes ont été reproduites pour mieux les appréhender. Dans ce cadre, nous pouvons considérer, au sein du département maintenabilité, qu'il existe deux types de simulations en accord avec les activités évoquées en chapitres II et III. Les simulations dites « réflexives » qui permettent de bien comprendre les situations de travail en déployant un protocole ergonomique (Bobillier-Chaumon et al., 2018). Cette simulation « réflexive » peut tendre vers une simulation « prospective », c'est-à-dire sur une situation qui n'existe pas encore. Dans le cadre du bureau d'études elle permet ainsi d'anticiper de futures difficultés et ainsi proposer des solutions en amont (Bobillier-Chaumon et al., 2018).

Dans la suite de ce chapitre, nous définirons brièvement la notion de simulation en EFH qui se veut commune quelle que soit l'approche évoquée (anticipation de l'activité en bureau d'études et retours d'expériences terrain). Nous allons également voir les nouvelles générations d'outils de simulation comme la réalité augmentée et des nouveaux cas d'application, notamment pour la pédagogie en maintenance.

2. De la conception des cockpits à la conception de la maintenance

En aéronautique, la notion de simulation est très ancienne. En effet, la simulation apparaît au début du 20^{ième} siècle avec les premiers simulateurs de vol. La Figure 23 montre un des tout premiers simulateurs de vol ayant pour vocation de comprendre et de développer des mécanismes, on ne parle pas encore de Facteurs Humains ou d'erreurs humaines, la notion n'étant alors pas encore développée ni comprise.



Figure 23: Un des tous premiers simulateurs de vol dans les années 1900.

La littérature voit l'émergence de la notion de psychologie en aviation au début de la première guerre mondiale, non pas pour concevoir mais pour sélectionner des pilotes avec une « bonne éducation et un bon caractère » pour être des pilotes militaires (Koonce, 1984). Cette approche est affiliée à la prestigieuse American Psychology Association (APA).

Plus tard, dans les années 1930 et 1940, à l'approche de la seconde guerre mondiale, il y a eu une très forte croissance de l'activité aérienne militaire, avec en parallèle un taux d'accidents très élevé. La Figure 24 montre un avion biplan, de structure bois et toile, ayant subi un accident suite à un phénomène vibratoire appelé « flottement dynamique » survenant lors de certaines phases de vol.



Figure 24: Avion biplan ayant subi un accident suite à l'apparition d'un phénomène vibratoire généré par une non maîtrise de l'appareil.

Ce phénomène vibratoire est à l'origine des premiers questionnements sur la nécessité de mieux former les pilotes, notamment au sol, en leur faisant comprendre, toutes phases de vols confondues, les risques potentiels. En effet, le flottement dynamique, très sensible sur biplan suivant le positionnement des ailes, de leur géométrie ainsi que la liaison des haubans reliant l'aile haute avec l'aile basse, survient à partir d'une certaine vitesse, voire d'un certain angle de vol. Un pilote bien formé, conscient du risque, peut ne pas aller dans ce domaine de vol souvent fatal. Les ingénieurs ont

ainsi commencé à comprendre que la technologie n'était pas la seule cause des accidents aériens. De plus la nécessité de former un grand nombre de pilotes dans des délais très courts a imposé une restructuration des formations militaires. C'est donc pour mieux former les pilotes et assurer une plus haute sécurité des vols que la simulation est devenue une étape indispensable. 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 25 a été créé dans les années 1930 par Edin Albert puis fabriqué à grande échelle au début de la seconde guerre mondiale (Figure 26). Appelé « Link Trainer, il a été le premier simulateur à être officiellement conçu et déployé à grande échelle ». 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 25: Link Trainer développé en 1930 par Edin Albert.



Figure 26: Link Trainer exploité par l'US Air Force, au Texas, pour la formation des pilotes.

Toujours pour la formation des pilotes, les premières immersions en simulateur peuvent être trouvées dans les années 1950, souvent au travers de simulateurs statiques mais ayant un niveau de réalisme de plus en plus abouti notamment en y intégrant des composants électroniques, reproduisant ainsi l'ensemble des instruments de bord. Les sociétés « Bell and the Western Electric Company » (Figure 27) ou « Curtiss-Wright Corporation » (Figure 28) sont les premières à proposer des modèles industriels.

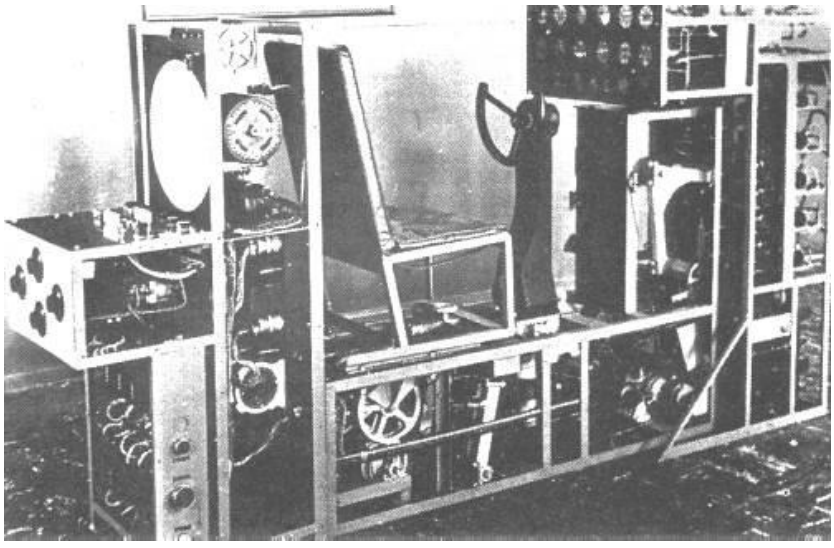


Figure 27: Premier prototype du simulateur de « Bell and the Western Electric Company ».



Figure 28: Premier prototype du simulateur de « Curtiss-Wright Corporation ».

La compagnie Américaine United Airlines, pour l'avion civile, sera la première à proposer un simulateur dynamique avec composants électroniques à cette même période. Officiellement, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) intègre en 1992 le document fondateur intitulé « Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Devices » devenant ainsi le standard international en termes de qualification des simulateurs de vol à usage commercial. Ce document vient à l'origine du « Flight Simulation Group » de la Société royale aéronautique du Royaume-Uni.

Au-delà de la formation des pilotes, la notion d'EFH dans la conception des cockpits émerge doucement au cours de la seconde guerre. En effet, beaucoup d'efforts ont été consacrés à la collecte de données sur les capacités et les limites des humains et à l'élaboration de lignes directrices pour la conception d'affichages et de commandes, de systèmes environnementaux, d'équipements et de systèmes de communication. Après la guerre, « Lectures on Men and Machines: an introduction to Human Engineering » par Chapanis et al., 1947, le "Blue book" de Paul Fitts sur la recherche psychologique sur la conception d'équipements (1947) et le manuel intitulé « Human Engineering Data for Design Engineers » préparé par le « Tufts Colleges Institute » et publié par le « Naval Special Devices Center » (1949) ont contribué à diffuser les connaissances concernant les performances humaines et la conception des équipements qui ont été développées par les premiers psychologues et ingénieurs en EFH.

Les constructeurs ont accéléré l'intégration de l'EFH à partir des années 1990. Par exemple, des travaux ont été menés pour fiabiliser l'approche de conception participative dans les cockpits d'avions. Nous pouvons citer notamment la thèse de Florence Reuzeau, 2000, menée au sein du groupe Airbus. Les travaux s'attardaient sur l'importance d'impliquer des utilisateurs (en l'occurrence des pilotes d'essai et de ligne), notamment à la demande des ingénieurs-concepteurs qui avaient encore du mal à percevoir l'intérêt du principe de concevoir « pour » et « avec » l'utilisateur. Ces travaux de recherche, menés directement dans l'industrie aéronautique, ont mis en avant, au travers de démarches et d'outils dédiés, la pertinence d'impliquer l'utilisateur pendant les phases de conception de systèmes dits complexes, comme le cockpit d'un avion. Plus particulièrement, l'analyse d'entretiens avec les pilotes, et l'observation de leur activité à travers des simulateurs ont permis de dégager des connaissances sur leurs contributions respectives dans la conception :

- Les pilotes (essai, ligne) ont des apports pertinents (niveau physique de l'interface) et/ou complémentaires (évaluation des automatismes, répartition des tâches dans l'équipage) ;
- Un rôle spécifique des pilotes d'essai, qui intervenant auprès des ingénieurs-concepteurs, deviennent des co-concepteurs ;
- Les pilotes n'évaluent pas la solution dans le cadre limite du scenario initial mais construisent un nouveau domaine de définition opérationnel.

La finalité de cette étude a été la construction d'une méthode d'assistance à l'évaluation participative, en formulant des critères de validité des données ainsi qu'une définition du rôle et des missions de l'ergonome. En effet, même si l'ingénieur-concepteur doit mieux intégrer le rôle de l'utilisateur, il doit aussi intégrer la participation de l'ergonome, qui reste centrale pour assurer une démarche EFH cohérente (Reuzeau, 1999).

Cette première partie met largement en avant la notion de simulation et d'analyses de l'EFH en faveur de l'activé de pilotage. La suite de ce chapitre va se concentrer sur la simulation lors des activités de maintenance.

3. Les outils de simulation en maintenabilité à des fins d'analyses de l'Ergonomie et des Facteurs Humains

Nos travaux de recherche ont expliqué assez tôt la notion de simulation en EFH, en appui avec une littérature nourrie sur ces sujets (Bernard et al., 2019). Rappelons néanmoins, et en comparaison à la conception des cockpits, que la conception de la maintenance tenant compte de l'activité des opérateurs spécialisés est assez récente. L'émergence des premières méthodes apparaît dans les années 1990 avec une réelle explosion dans les années 2000. En effet, l'avènement des outils de simulation digitaux a permis de répondre à beaucoup de besoins industriels. Ainsi, les technologies immersives ont de nombreuses potentialités concernant des usages industriels émergents en lien avec l'EFH. Elles peuvent, par exemple, permettre de visualiser des phénomènes, invisibles et complexes, de manière intelligible comme le fonctionnement de système mécanique (Christmann et al., 2022), d'accélérer les processus de conception (Fleury & Richir, 2021) ou de former des opérateurs (Van Wyk & De Villiers, 2009). Également, dans le cadre d'études en lien avec l'EFH, la captation de données physiologiques peut être couplée avec une expérience immersive pour mieux prendre en compte l'état de l'opérateur (Houzangbe et al., 2021). Les technologies immersives trouvent de nombreux usages en termes de simulation, pour de la sensibilisation (Pithon et al., 2009), de la formation à la sécurité (Zhao & Lucas, 2015) ou à des gestes techniques (Alvarez-Lopez et al., 2020). Des guidelines ont émergé pour concevoir des simulations convaincantes en réalité virtuelle et en réalité augmentée (Richir et al., 2015), ainsi que des outils d'évaluation de l'expérience utilisateur en immersion (Tcha-Tokey et al., 2016). Dans notre contexte industriel et de bureau d'études en maintenabilité, la simulation permet assez rapidement, dans les phases de conception, de simuler des activités. Cela n'assure pourtant pas la justesse des analyses car dans une grande majorité d'études, l'ergonome est rarement impliqué, seul l'ingénieur-concepteur travaille par expérience, parfois avec l'appui de normes pas toujours maîtrisées. Un autre facteur, rappelons-le, qui justifie la volonté de mieux prendre en compte l'EFH en conception de la maintenance est le taux d'accidents avec pour origine

une erreur pendant l'activité de maintenance. On l'estime ainsi comme la deuxième cause d'accidents aériens.

Les parties qui suivent détaillent les outils de simulation majeurs utilisés en industrie et dont la littérature scientifique regorge d'exemples.

3.1. Outils de simulation courants

La simulation passe par l'intermédiaire d'outils de simulation qui de nos jours, se voient de plus en plus digitaux, sans pour autant omettre la notion de contacts physiques, critères essentiels pour réduire l'écart entre virtuel et réel. Nos travaux précédents ont notamment montré les avantages et les inconvénients de chacun d'eux (Bernard et al., 2019), induisant ainsi leur complémentarité qui auront permis, entre autres, de construire la méthode PEAM (Bernard et al., 2023).

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 EFH à des fins de pouvoir mieux intégrer l'EFH 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 analyses EFH autour des composantes physiques, cognitives et organisationnelles. Ainsi, au regard de l'état de l'art, nous présentons les trois outils de simulation selon 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'EFH. 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 l'EFH mais là encore, l'approche reste essentiellement centrée sur le composant humain (Human factors).

  Pour améliorer les résultats des analyses EFH, 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. La Figure 29 montre un système haptique spécifiquement développé pour entrainer les chirurgiens aux gestes fins.



Figure 29: Exemple de système haptique pour l'entraînement d'actes chirurgicaux.

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 maquettés (Figure 30) (Chagué & Charbonnier, 2016). 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, avec des interactions physiques multiples, l'opérateur immergé peut dès lors exécuter l'ensemble des sous-tâches.

Les systèmes tangibles permettent ainsi une double interaction :

- **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 ;

- **Figurative**, 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.



Figure 30: Environnement tangible lors d'une simulation en réalité virtuelle.

La physicalisation d'éléments virtuels 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. Un niveau de détail optimisé permet à l'opérateur de retrouver ses réels repères visuels, sans différence significative avec la réalité. Les pièces manipulées, lorsqu'elles reproduisent les volumes, les formes, les masses et les centres de gravité, assurent des comportements sans différence avec la situation réelle (Das & Sengupta, 1996 ; Boy, 2018).

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

  En maintenabilité, l'exemple évoqué dans la section 4.2 du chapitre III (détection sensitive de défauts sur un roulement à billes de plateau cyclique) illustre parfaitement l'efficacité d'un maquettage physique reproduisant les conditions réelles du terrain. Cette notion de représentativité autour des maquettages physiques a été évoquée par Bayramzadeh et al., 2018, dans le monde médical. L'étude traite de l'optimisation des salles d'opération en simulant, selon les auteurs, des actions, des activités, des flux de personnes… permettant, in fine, d'avoir une vision plus pragmatique de l'ensemble des activités dans un environnement donné, alors que nous restons dans des **situations réalistes mais pas encore réelles**.

3.2. Nouveaux usages d'outils digitaux pour la simulation d'activité

Dans notre contexte de maintenance aéronautique, l'expérience industrielle nous a amené à constater que certaines situations de travail ne sont pas simulables autrement que par le biais d'une maquette physique, donc une démarche longue et coûteuse qui ne peut être réalisée dès le début

d'un processus de conception. Pour bien comprendre, prenons un exemple majeur qui a fait l'objet d'une publication scientifique (Paquin et Bernard, 2023). Lors de nos travaux de recherche initiaux, et plus particulièrement pendant la thèse, la démarche PEAM a mis en évidence que certaines tâches de maintenance ne peuvent pas être simulées au travers de la réalité virtuelle. Typiquement, l'action quotidienne d'un opérateur de maintenance consistant à passer du sol au moteur, par l'intermédiaire de marchepieds et de poignées, ne peut pas être étudiée autrement que par les outils actuellement utilisés, c'est-à-dite le mannequin numérique et la maquette physique. Cependant, l'inspection des moteurs et du rotor est une activité quotidienne, parfois même répétée plusieurs fois dans une même journée. L'enjeu est multiple afin de bien concevoir et d'anticiper le dimensionnement, l'emplacement et le nombre de marchepieds et de poignées, sont majeurs en phase de conception :

- Enjeu de **sécurité** : quand bien même la réglementation du travail en hauteur impose de se protéger (protection collective, individuelle, etc), cette même réglementation ne donne pas de définition du travail en hauteur mais impose à l'employeur de diagnostiquer des risques de chutes (INRS, 2017). Le code du travail propose d'ailleurs de nombreux articles, notamment dans l'article L. 4121 et composantes (obligation de l'employeur), dans lesquels on retrouve une thématique sur la sécurité des lieux de travail (articles R4224-1 à R4224-24, chapitre 4) (Legifrance, 2009). Le constructeur d'hélicoptères doit donc étudier comment la transition entre le sol et le rotor peut se faire en sécurité et apporter des solutions.
- Enjeu de **design et réduction de masse** : tout aéronef, qu'il concerne les voilures fixes (avion) ou voilures tournantes (hélicoptères), ne peut « bien » voler que si sa masse est réduite et optimisée. Réduire la masse c'est aussi s'assurer un emport de passagers, de fret ou de carburant plus important. Il existe d'ailleurs des campagnes de réduction de masse chez tous les constructeurs pour « chasser » le surplus (Hermann et al., 2005 ; Chatterjee & Bhowmik, 2019). Les marchepieds et les poignées sont ainsi des éléments qui peuvent générer de la masse à cause des renforts nécessaires, d'autant plus si ces derniers sont « pliables » (Figure 31) par exemple.



Figure 31: Marchepied pliable sur le fuselage d'un hélicoptère.

- Enjeu d'**aérodynamisme** : l'ajout d'éléments sur le fuselage perturbe l'écoulement de l'air, pouvant entrainer une baisse de performance du vol, et une consommation de carburant plus élevée.
- Enjeu de **maintenance** : les marchepieds sont composés de revêtements antidérapants qu'il est nécessaire de changer quand leur efficacité diminue. Également, les marchepieds repliables sont composés de mécanismes à ressort leur permettant de se rabattre sur le fuselage et d'y être maintenus. Ces systèmes doivent aussi faire l'objet de vérification, d'une part pour s'assurer qu'ils ne risquent pas de se déplier pendant le vol et également qu'ils ne risquent pas de se détacher lorsque l'opérateur pose ses pieds dessus.

Ces enjeux, évoqués au travers d'exemples industriels et de littératures scientifiques, montrent la très grande nécessité de collaborer avec des acteurs-métiers différents, tous acquis à leurs causes dans leur domaine respectif. La négociation, la recherche de compromis technique doit donc se faire à armes égales, avec des arguments solides et objectifs qui ne font pas que montrer mais bien démontrer des difficultés que pourraient vivre le client.

Le contexte opérationnel de cette activité montre l'impossibilité de s'attacher pendant cette phase de transition entre le sol et le haut de l'hélicoptère. L'opérateur viendra s'attacher une fois arrivé sur la zone de station pour réaliser son inspection. Cela impose au département maintenabilité d'étudier en détail l'emplacement des marchepieds et des poignées afin que tous les opérateurs, quelle que soit leur stature, puissent garder l'équilibre et avoir au moins 3 points de contacts en permanence entre les pieds et les mains. De plus, les opérateurs de maintenance, depuis les marchepieds, vont réaliser des inspections visuelles avant chaque vol, à travers des trappes ou des ouvertures de capots mobiles. Ces inspections sont rapides (sécurité, état général, niveau d'huile, corps étranger, ...) mais doivent absolument être réalisées. Cela implique que dès la conception, le département maintenabilité doit assurer la fiabilité de cette future tâche et donc assurer la capacité pour les opérateurs d'avoir un bon accès physique et visuel. La Figure 32 montre un exemple d'inspection sur un hélicoptère léger.



Figure 32: Inspection avant vol du rotor d'un hélicoptère type H125.

Nous pouvons ainsi dire que dès les phases de conception, dans le cadre de cet exemple, le bureau d'études maintenabilité doit anticiper deux tâches :

- Monter/descendre de l'hélicoptère, que l'on peut voir comme une « phase de transition » ;
- Vérifier visuellement, voir physiquement au toucher, l'environnement moteur, rotor, boîte de transmission, hydraulique etc. On peut voir ces tâches comme une « phase de station ».

Ainsi, la question de l'anticipation de l'activité doit se poser très tôt dans le processus de conception, comme nous l'avons vue dans le chapitre II. En accord avec la définition des outils de simulation digitaux vus précédemment, le mannequin numérique et la réalité virtuelle ne sont pas suffisants pour valider l'ensemble des tâches à réaliser depuis les marchepieds. Il reste ainsi à valider certaines hypothèses sur une maquette physique pour des sujets spécifiques non simulables numériquement pour plusieurs raisons (Rauschnabel et al., 2022) :

- Complexité du sujet, en fonction du nombre d'interaction(s) physique(s) avec l'environnement difficilement simulable en VR ;
- Nature de la tâche impliquant un déplacement vertical de l'opérateur, s'interposant entre le sol et le pont moteur, pouvant mettre en danger la sécurité.

Cependant, même si des solutions existent pour dépasser ces limites, comme l'ajout de dispositifs haptiques ou d'interfaces tangibles très couteux et long à mettre en œuvre (Knöpfle et Voβ, 2000) sur

les plateformes de réalité virtuelle, réaliser des analyses de l'EFH impose une certaine rigueur et un savoir-faire. Il est ainsi nécessaire de former et de faire monter en compétences particulières tous les intervenants (ergonomes, ingénieurs, opérateurs de maintenance) avec des sessions collaboratives nécessitant plusieurs casques VR (Rakkolainen et al., 2021).

C'est dans ce contexte que nous avons voulu tester la réalité augmentée (RA) comme outil de simulation alternatif et complémentaire. La réalité augmentée a été identifiée comme une solution potentielle pour surmonter les limites des outils de simulation existants. Lors de l'utilisation de la réalité augmentée, une couche numérique est superposée sur le monde physique, intégrant l'environnement physique réel avec des éléments virtuels pour améliorer ou « augmenter » l'expérience du monde réel (Leiber et al., 2021). Cela peut être effectué à l'aide de smartphones, tablettes, lunettes intelligentes et autres écrans montés sur la tête (Papadopoulos et al., 2021). Pour un cas d'utilisation de simulation de maintenance, des lunettes intelligentes ou les visiocasques sont adaptés pour fournir à l'opérateur une vue à l'échelle du modèle et la capacité d'interagir avec sa main et son corps dans l'environnement virtuel. La Figure 33 qui suit montre un opérateur capable de se déplacer et d'interagir avec un modèle 3D d'une pièce.

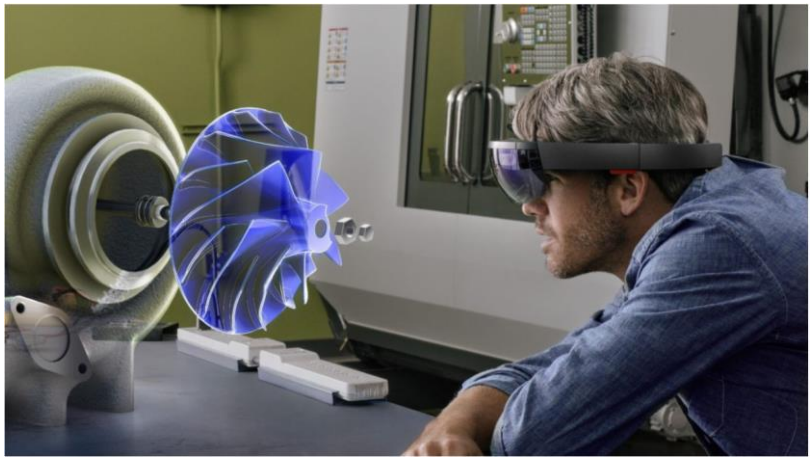


Figure 33: Usage d'un casque de réalité augmentée (Hololens, Microsoft) dans l'industrie.

Cet outil déjà utilisé au sein de nombreuses entreprises (navales, énergies, électroniques …) pour assurer de nombreuses fonctions et applications telles que la formation, les revues de design collaboratives, le support à la maintenance ou encore le contrôle qualité (Röltgen & Dumitrescu, 2020). Mais la littérature ne semble pas faire ressortir d'application pour l'évaluation l'EFH pendant les phases de conception de la maintenance au travers de cet outil de simulation. En revanche, nous pouvons noter que des travaux en EFH se sont intéressés à l'AR lorsque celle-ci était encore en phase de technologie dite émergente. Plus particulièrement, les travaux s'intéressent à comment concevoir l'usage de l'AR pour l'adapter à l'activité de maintenance pour les techniciens automobile (Anastassova, 2006).

Depuis quelques années, les dispositifs AR sont évalués et déployés dans l'industrie aéronautique (De Crescenzio et al., 2010). Les appareils AR sont déployés dans plusieurs zones pour différents types de cas d'utilisation :

- Fournir des instructions pour la fabrication ou l'entretien (Safi et al., 2019) ;
- Effectuer une revue de conception d'un système modifié sur un avion physique existant (Obermair et al., 2020) ;
- Fournir une assistance à distance pour les clients ou les opérateurs situés dans un endroit différent (Rauschnabel et al., 2022) ;
- Faire des démonstrations de vente et de marketing pour améliorer la perception du produit (Wang et Qi, 2022).

Dans notre observation, l'utilisation de la réalité augmentée a été associée à une maquette physique simple, c'est-à-dire, une structure en bois simulant uniquement le fuselage et les marchepieds/poignées, sans aucun autre détail. Sur cette maquette, le port d'un casque de réalité augmentée vient superposer tous les éléments structurels (moteur, rotor, tuyauterie hydraulique etc). Nous parlons alors de solution hybride, la maquette en bois représentant la structure de l'hélicoptère ne change pas dans le temps mais permet de faire varier des ensembles mécaniques superposés numériquement sur la maquette bois (AR) et qui évoluent de manière très récurrente pendant les phases de conception. Le protocole déployé a permis d'observer 16 participants. A chaque passage, deux casques étaient disponibles : un pour le participant et un pour l'ergonome afin qu'il puisse lui aussi superposer les éléments numériques dans l'environnement. La Figure 34 montre l'environnement de travail, basé soit sur une maquette bois (à droite) soit sur une structure simple (à gauche) sur laquelle un modèle 3D vient se superposer pour ajouter des composants mécaniques (moteurs etc).



Figure 34: Configuration de deux casques de réalité augmentée, l'un pour le participant réalisant la tâche et l'autre pour l'observateur.

Nous avons ainsi testé la capacité de cette solution hybride à améliorer la conception en utilisant les commentaires des participants, basés sur des questionnaires et des critères précis (ressenti de la difficulté globale, capacité à atteindre les marchepieds et les poignées en fonction de la stature de l'opérateur, quantifier des risques de chutes observés…). En substance, l'expérimentation a mis en évidence plusieurs points :

- La solution hybride réduit les délais de développement et de décision ;
- Elle réduit le coût de la maquette en utilisant uniquement la forme de base du modèle et des interfaces tangibles pour l'opérateur ;
- La réalité augmentée améliore les détails du modèle et permet de revoir plusieurs configurations ;
- Elle favorise la collaboration entre les ingénieurs-concepteurs et les parties prenantes du projet ;
- Elle favorise une conscience partagée de l'environnement, et de la future activité de travail.

Notre observation a ainsi mis en évidence que la réalité augmentée est efficace pour influencer le design efficacement au regard d'une analyse de l'activité, permettant ainsi d'être complémentaire à d'autres outils de simulation comme la réalité virtuelle. Également, nous relevons que l'outil de simulation joue un rôle fédérateur pour faire comprendre à tous les acteurs-métiers d'un bureau d'études les enjeux autour des analyses EFH.

La partie qui suit vise à montrer comment les outils digitaux permettent d'assurer la préparation des analyses EFH et les analyses EFH elles-mêmes, quel que soit le contexte socio-économique…comme la crise sanitaire COVID-19.

4. Outils de simulation : adaptabilité à tous les contextes, même de crise sanitaire

En phase de conception, la capacité à optimiser le compromis entre les critères techniques et les exigences EFH débute par la mise en place d'un protocole. Ce protocole permet d'anticiper, de préparer l'analyse EFH et déjà, de tenter d'obtenir l'adhésion de bon nombre d'interlocuteurs de l'industrie, très souvent non spécialistes en EFH. Et c'est d'autant plus vrai que notre démarche industrielle impose de prendre en compte de plus en plus tôt l'opérateur au travers de la démarche EFH (Buisine et al., 2018, Kolus et al., 2018) nécessitant le déploiement de nombreux protocoles. Comme nous l'avons dit jusqu'ici, nos travaux de recherche se focalisent grandement sur cet objectif en bureau d'études, afin de favoriser « l'ergonomie de conception » (Belleghem, 2018). En rappelant qu'en phase de conception le produit fini n'existe pas, a priori, l'analyse EFH passe donc par des phases de simulation, articulées avec les phases de conception. La simulation, qu'elle soit réalisée sur des maquettes physiques ou digitales comme les technologies de réalité virtuelle, impose la construction et l'application de protocoles pour préparer la dite simulation et, de fait, l'analyse EFH. Il faut en effet préparer les maquettages physiques et/ou digitaux pour assurer leur représentativité au regard du réel, recruter les personnes qui « joueront le rôle » des futurs opérateurs comme les opérateurs de maintenance, fédérer les différents acteurs-métiers du bureau d'études impactés par les résultats de l'analyse (cf Chapitre II). Cette préparation, impliquant la disponibilité de ressources humaines, matérielles et financières, peut constituer un frein à l'intégration d'exigences EFH pendant les phases de conception, surtout lorsque les interlocuteurs ne sont pas convaincus des apports de l'ergonomie de conception (Broberg, 2007). Ce constat a été d'autant plus marqué à l'aube de la crise sanitaire COVID-19, en mars 2020. Ce facteur exogène a agi comme un révélateur en venant littéralement bouleverser les processus de préparation des analyses EFH. Dans cette situation inédite, de

nombreuses structures industrielles ont innové, dans l'urgence, en mettant en place des organisations spécifiques afin de pérenniser leurs activités dans ce contexte socio-économique difficile. C'est dans ce contexte de résilience que nous nous situons dans cette partie, au sein même du bureau d'études de notre industriel aéronautique. En effet, le processus de préparation des analyses EFH a dû être adapté au contexte de la crise, notamment dès le premier confinement de la crise COVID-19 entre mars et avril 2020. Observant assez rapidement un écart de performance du déploiement du protocole de préparation, pré et post-confinement, nous avons souhaité qualifier et quantifier l'activité de préparation d'analyses EFH au sein de cette industrie (Bernard & Loup-Escande, 2023).

Cette étude repose sur la quantification d'indicateurs étudiés en deux périodes. Avant la crise de janvier à février 2020, nous avons travaillé a posteriori en étudiant tous les échanges mails et les résultats obtenus des analyses EFH réalisées et enregistrées avant la crise. Pendant la crise, nous avons fait un travail quotidien pour récolter les données provenant des mails et pouvoir ainsi noter les indicateurs. Au total, 8 indicateurs répartis en deux catégories ont été suivis :

- Indicateurs de préparation de l'analyse EFH permettant d'évaluer l'organisation et l'efficacité de la mise en place de protocoles d'analyses EFH : le temps de préparation entre la demande initiale et la réalisation de l'analyse, notamment le début de la simulation de l'activité ; le nombre d'interlocuteurs pour préparer l'analyse ; l'utilisation de technologie de réalité virtuelle ou d'une maquette physique ;
- Indicateurs sur les exigences de la simulation permettant d'évaluer le respect des critères décrits dans le protocole ergonomique par l'ensemble des interlocuteurs, souvent non spécialistes en EFH : respect des trois statures des opérateurs souhaités (petit, moyen, grand) ; une expérience minimum de 10 ans des opérateurs sélectionnés ; une bonne connaissance de la procédure de maintenance ; une bonne représentativité de la zone de travail, une bonne représentativité de l'environnement de travail global. Précisons que la notion de représentativité est importante car même si au sein du constructeur il existe un atelier de maintenance, celui-ci ne reflète pas toutes les contraintes des clients (type et disponibilité des outillages, disponibilité des éléments de sécurité…). Ainsi, nous sélectionnons des opérateurs de maintenance travaillant chez le constructeur pour les mettre en situations physique et organisationnelle telles que rencontrées chez le client.

Notre étude a montré que le télétravail et l'usage de la réalité virtuelle peuvent former un couple performant pour réaliser des analyses EFH à distance. Plus particulièrement, nous avons observé des temps de préparation plus courts (divisés par 2), ainsi qu'un nombre d'interlocuteurs plus faible que dans un contexte de travail physique (divisé par 3). Cependant, le télétravail doit se faire dans un contexte régulé et maîtrisé pour rester aussi efficient et efficace qu'une situation de travail non distanciée, qui reste, dans les deux cas, une situation de travail collaborative. En effet, les savoirs et savoir-faire varient de l'ergonome à l'ingénieur-concepteur en passant par l'opérateur de maintenance. La mise en relation de chacun peut passer par des moyens purement digitaux qui se démocratisent de plus en plus : visio-conférence, mail, immersion en réalité virtuelle. L'orchestration des interlocuteurs ne sera en revanche performante que si le niveau de connaissance sur chacun de ces outils est suffisant. Plus particulièrement avec l'usage de la réalité virtuelle, dont la maîtrise technique est nécessaire pour assurer une validité écologique de la simulation la plus élevée possible.

Ainsi, cette étude nous a amené à proposer un modèle de l'articulation entre télétravail, ou plus largement en travail distancié, et réalité virtuelle, en particulier à des fins de préparation d'analyses EFH (Figure 34). Il conviendra de l'éprouver au travers d'une méthodologie dédiée, après avoir cadré la notion de télétravail ainsi que de travail distancié et avoir formé, sensibilisé les acteurs-métiers du bureau d'études à l'usage de la réalité virtuelle. Ce modèle, composé de trois étapes classiques correspondant au fonctionnement habituel d'une préparation d'analyse (Barcellini et al., 2013), il intègre le travail distancié et l'outil de réalité virtuelle :

- Etape 1 : Demande initiale (protocole EFH) envoyée par l'ergonome du département maintenabilité. Ce protocole est envoyé par mail vers les interlocuteurs du bureau d'études et de l'atelier de maintenance ;
- Etape 2 : Réponse aux exigences du protocole EFH par les interlocuteurs du bureau d'études de l'atelier de maintenance. L'échange avec l'ergonome se fait par visio-conférence. Les exigences sont indépendantes entre les différents interlocuteurs, ces derniers ne communiquent pas entre eux mais uniquement avec le demandeur initial et donc l'ergonome ;
- Etape 3 : Réalisation de l'analyse EFH de manière collaborative avec la participation de l'opérateur, de l'ergonome du département maintenabilité et des interlocuteurs du bureau d'études impactés et dont les résultats de l'analyse EFH impacteront potentiellement leur conception. L'opérateur est obligatoirement immergé en réalité virtuelle avec, si possible, un dispositif haptique ou physique pour réduire l'écart entre le monde virtuel et le monde réel (Boy, 2019). L'opérateur partagera, avec l'ergonome et avec les ingénieurs-concepteurs, son immersion, soit en visio-conférence, soit en les intégrant directement dans le monde virtuel comme spectateur. Cette dernière option suggère que l'ergonome et les ingénieurs-concepteurs disposent d'une technologie de réalité virtuelle avec eux.

En synthèse, la Figure 35 détaille le processus idéal, dans un contexte distanciel, pour répondre aux exigences du protocole EFH commun émises par les ergonomes du département maintenabilité.

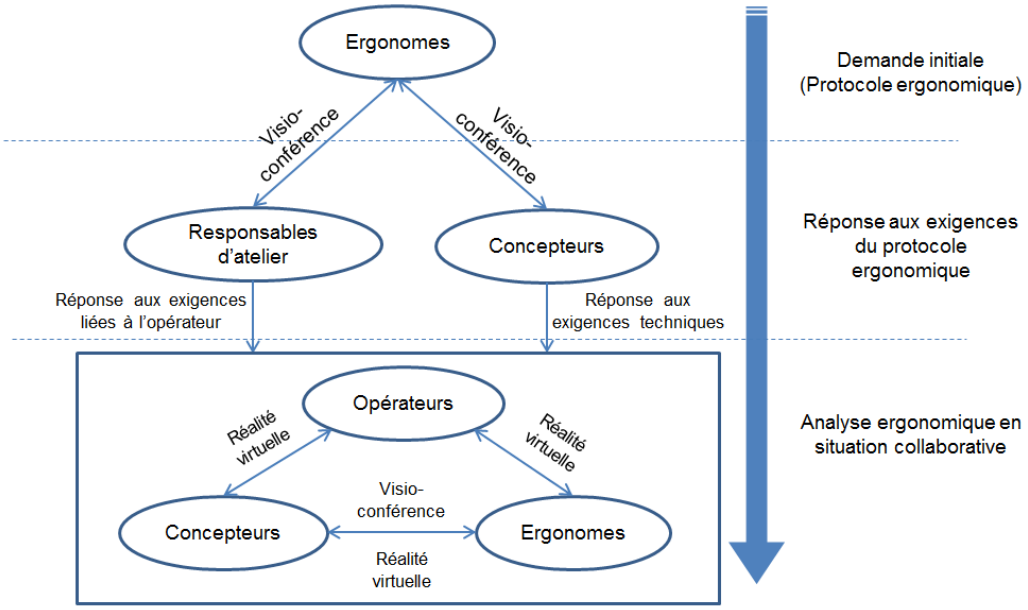


Figure 35: Modèle de la préparation d'une analyse ergonomique et de sa passation dans un contexte de travail distancié, en utilisant les technologies de communication de visio-conférence et les technologies de simulation de réalité virtuelle (Bernard et Loup-Escande, 2023).

La partie suivante vise à mieux comprendre l'impact pédagogique des outils de simulation lors des analyses EFH.

5. La simulation comme support de l'analyse ergonomique et support pédagogique

Les chapitres précédents mettent en avant plusieurs constats au travers de la pratique de l'EFH en maintenabilité :

- Il est nécessaire de collaborer avec des non spécialistes en EFH pour faire valoir les recommandations EFH face à des critères mécaniques et de conception. Cela induit que l'ergonome devra traduire ses études en les rendant accessibles ;
- L'usage des outils de simulation, qu'ils soient digitaux ou physiques, permet de simuler une activité future avec des opérateurs et ainsi de mieux faire comprendre les contraintes que vivra l'opérateur. Un non spécialiste en EFH, qu'il soit simplement observateur ou qu'il simule par lui-même une activité, ressentira les difficultés que sa propre conception pourrait faire subir à l'opérateur.

Les outils de simulation agissent, selon nous, comme des Objets Intermédiaires de Conception (OIC). Les OIC se définissent comme des moyens (dessins techniques, rapports, outils de simulation…) facilitant les échanges et la communication entre ingénieurs-concepteurs ou plus largement, tous les acteurs-métiers participant à la conception d'un produit/système (Al Khatib, 2015). De manière historique, Jeantet, 1988, évoque l'importance du rôle des OIC au sein même d'une organisation, parlant même de l'influence des OIC sur les choix organisationnels d'une équipe d'ingénieurs-concepteurs. Ce même auteur évoque que les OIC jouent « un triple rôle de « traduction », de

« médiation », et de « représentation des actions ». Les OIC facilitant ainsi les échanges et la coopération, ils permettent, en d'autres termes, que les acteurs-métiers se comprennent mieux, plus particulièrement sur les exigences de chaque département qui parfois s'opposent (Vinck, 2009). Même si les OIC peuvent toucher n'importe quel moyen permettant de réunir au moins deux acteurs-métiers pour se comprendre, les outils digitaux ont apporté une nouvelle dimension à la collaboration. En effet, elle fait désormais partie intégrante de la conception, puisque la collaboration par la voie de la simulation, permet de percevoir, d'anticiper et de proposer des besoins opérateurs. Et ce changement de paradigme appuie les propos de Perrin, 2021, qui explique que la conception est de plus en plus le pilier central de l'innovation, changement déjà évoqué par Kline et Rosenberg en 1987 en écrivant déjà « le processus central de l'innovation n'est pas la science mais la conception ».

La conception comme pilier de l'innovation, de propositions d'idées nouvelles semble aller de pair avec l'avènement des outils de simulation numériques jouant ce rôle d'OIC. Et finalement, gagner en compréhension sur les attentes de chacun au sein d'un groupe de travail relève de la pédagogie. De manière usuelle, la pédagogie se définie comme un « Ensemble des méthodes utilisées pour éduquer les enfants et les adolescents » ou « Pratique éducative dans un domaine déterminé » selon le dictionnaire Larousse (2023). Le terme commun qui ressort est « éducation » qui lui-même se définit comme « Action d'éduquer, de former, d'instruire quelqu'un ; manière de dispenser cette formation. » (Dictionnaire Larousse, 2023). Ces définitions soulèvent deux aspects importants : le moyen et la méthode. Le moyen est notre OIC, donc les outils de simulation (pour ne parler que d'eux) mais la méthode est essentielle. En outre, nous avons vu dans les chapitres précédents que les outils de simulation ne sont pas toujours bien connus ni reconnus comme étant efficaces dans la recherche de solutions et de compromis techniques. Il semble donc essentiel d'apporter aux acteurs-métiers en bureaux d'études maintenabilité une meilleure connaissance des outils de simulation pour qu'ils puissent mieux collaborer entre eux mais aussi mieux percevoir les analyses EFH. Il est d'ailleurs intéressant de voir que des recherches ont estimé que l'analyse EFH peut être perçue comme 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 EFH sur la base de règles métiers communes, en accord avec les travaux de Martin & Baradat (2003). Également, la simulation d'une activité peut rentrer dans le cadre de l'approche pédagogique dite « inductive-déductive ». Pour bien comprendre cette approche centrale dans notre réflexion, nous proposons de définir la notion inductive et déductive :

- Tandis que le terme "inductif" fait référence à l'approche pédagogique de partir des spécificités d'un concept et travailler ensuite vers le général (c'est-à-dire partir des "exemples spécifiques" pour tendre vers les "règles générales") (Decoo, 1996) ;
- D'une manière générale, le terme "déductif" fait référence à l'approche pédagogique consistant à partir du concept général et ensuite travailler sur les spécificités du concept (c'est-à-dire en partant des "règles générales" pour tendre vers des "exemples spécifiques") (Decoo, 1996).

De nombreuses recherches explorent la comparaison entre les deux approches inductives et déductives et le bénéfice d'une approche « inductive-déductive » (Soiferman, 2010 ; Vogel et al., 2011 ; Strauch, 2017; Wardani and Kusuma, 2020). Les secteurs de la maintenabilité et de la

maintenance aéronautique pourraient en bénéficier au travers de nouveaux usages des outils de simulation. En effet, dans l'aéronautique, et plus particulièrement dans la formation à la maintenabilité et à la maintenance, les tâches sont très nombreuses et très variées. De manière générale, au cours des trois dernières décennies, les industries aéronautiques ont intégré des outils de simulation pour améliorer la conception et anticiper l'intervention humaine. Le concept de simulation en EFH a été abordé et documenté à de nombreuses reprises, souvent suite à des besoins spécifiques découlant de cas réels dans les industries aéronautiques (Oberhauser & Dreyer, 2017 ; Kumar et al., 2018) ou nucléaires (Xiyun et al., 2018) pour ne citer que ces deux exemples. La simulation en EFH a deux objectifs majeurs en maintenance : anticiper l'activité future de maintenance dans les étapes de conception ainsi que la formation des opérateurs dans un nouveau poste de travail. Dans les deux cas, « la simulation est au fond la tentative de renverser ou d'inverser le cours du temps pour en pallier les principaux effets et de tenter de s'en rendre maître » (Dubey, 1997, p. 51). Nous pouvons donc dissocier deux temporalités :

- Phases de conception : la simulation doit fournir suffisamment d'informations à l'ingénieur-concepteur pour s'approprier l'environnement futur afin de discerner toutes les subtilités de l'interaction potentielle entre l'opérateur, le système, le poste de travail, l'outil et l'environnement. L'ingénieur-concepteur peut alors jouer efficacement son rôle, modifier les spécifications techniques pour les adapter aux caractéristiques et aux attentes de l'opérateur. Au-delà de l'aspect conceptuel du produit, la simulation peut permettre d'anticiper les « erreurs humaines », notamment dans le secteur nucléaire (Zou et al., 2017) ou encore dans l'aéronautique (Strauch, 2017). En effet, ces auteurs proposent d'utiliser des outils de simulation numériques comme la Réalité Virtuelle pour étudier, comprendre et anticiper le comportement des opérateurs. En mettant en œuvre de nombreuses simulations qui mettent les opérateurs à l'essai dans différentes conditions, il devient possible d'observer des risques et des erreurs récurrentes, qui peuvent être corrigés en améliorant les systèmes, l'environnement physique, voire même la formation des opérateurs ;
- Phases de formation : l'opérateur, au travers même des outils de simulation, pourra connaître les stratégies à adopter, les informations essentielles pour mémoriser et apprendre les mouvements spécifiques pour mener à bien son activité le plus efficacement possible, en respectant toutes les règles de sécurité.

Ce besoin émergeant, de mieux comprendre et de mieux former aux usages des outils de simulation nous questionne notamment autour de l'intégration de l'EFH. Nous posons la question suivante : « comment mieux sensibiliser les acteurs-métiers à l'EFH en maintenabilité au travers des outils de simulation ? ». Cette question va au-delà de nos recherches précédentes, notamment sur les besoins de fiabiliser l'usage et la performance des outils de simulation à des fins d'analyse EFH. Désormais, la question est de savoir si les outils de simulation sont adaptés pour former et transférer de l'information à des acteurs métiers en maintenabilité non spécialistes en EFH.

L'apprentissage doit passer par la formation et l'éducation. Une des voies probables est la formation des jeunes générations. L'université restant un merveilleux laboratoire pour tester, éprouver des processus, des méthodes et des outils, nous avons souhaité éprouver nos idées au sein de l'université d'Aix-Marseille et plus particulièrement dans le centre Polyaero (Cf. chapitre I). Au sein de cet institut, nous avons développé des enseignements autour de la réalité virtuelle, d'une part pour les sensibiliser à l'outil de simulation et d'autre part pour les sensibiliser à l'activité de maintenance. Plus

particulièrement, les étudiants doivent diagnostiquer des risques au travail par la voie de la simulation et ainsi proposer des solutions qui pourront permettre d'optimiser la conception du produit étudié. Nous avons mené une étude sur l'utilisation de la réalité virtuelle en tant qu'outil d'enseignement et de formation ainsi qu'en tant qu'outil industriel dans des cas réels sur le terrain. Sur 2 ans (entre 2018 et 2020), nous avons formé et observé 112 étudiants. Deux enquêtes principales ont été utilisées, la première en début d'année académique (pour mieux connaître l'expérience antérieure des étudiants en VR) et la seconde enquête en fin d'année (pour avoir des retours des étudiants sur leur année de formation en VR) (Bernard et al., 2022). Cette étude nous a amené à formuler et à présenter des recommandations pour appliquer de meilleures approches pédagogiques inductives-déductives offrant ainsi plus d'études de cas et une meilleure compréhension de la maintenance aéronautique par les étudiants. Nous avons également formulé des recommandations pour améliorer l'utilisation de la réalité virtuelle :

- Identifier clairement les élèves avec et sans antécédents en termes d'expérience en réalité virtuelle. Pour stimuler les étudiants, chaque groupe de travail doit avoir un mélange d'étudiants avec et sans expérience VR précédente. Les étudiants ayant une expérience antérieure en réalité virtuelle peuvent aider et encourager les étudiants sans expérience. Cette aide, en plus des exercices d'enseignement et de formation, permet aux étudiants de mieux synthétiser et retenir les informations clés qui, à leur tour, améliorent leurs connaissances et compétences ;
- Les approches inductives-déductives doivent être continuellement appliquées et activement proposées pour offrir davantage de cas d'études et une meilleure compréhension du travail et de situations réelles de maintenance aéronautique (Okutsu et al., 2013 ; Wardani et al., 2020) ;
- Améliorer les simulations en ajoutant des éléments physiques afin d'aider à mieux synchroniser le monde virtuel et réel. L'utilisation de pièces imprimées en 3D et la numérisation 3D d'éléments manquants seront essentielles pour réduire les écarts et les inexactitudes entre les mondes virtuel et réel. Cette observation rejoint le constat fait dans la section 3 du présent chapitre ;
- Soutenir et promouvoir activement les nouvelles technologies de réalité virtuelle en les rendant facilement disponibles et facilement accessibles aux étudiants. Le temps de préparation des modèles 3D et la préparation de scénario doivent être réduits, mais l'amélioration des outils 3D tend vers cette logique. Ajouter des fonctionnalités au logiciel de réalité virtuelle pour simuler la manipulation de pièces avec de vrais mouvements physiques et le comportement pour améliorer la précision et le réalisme de la représentation 3D. Améliorer le rendu des pièces 3D pour mieux immerger les étudiants dans un environnement virtuel. La Figure 36 montre une plateforme de réalité virtuelle au centre Polyaero avec une étudiante manipulant physiquement une pièce maquettée.

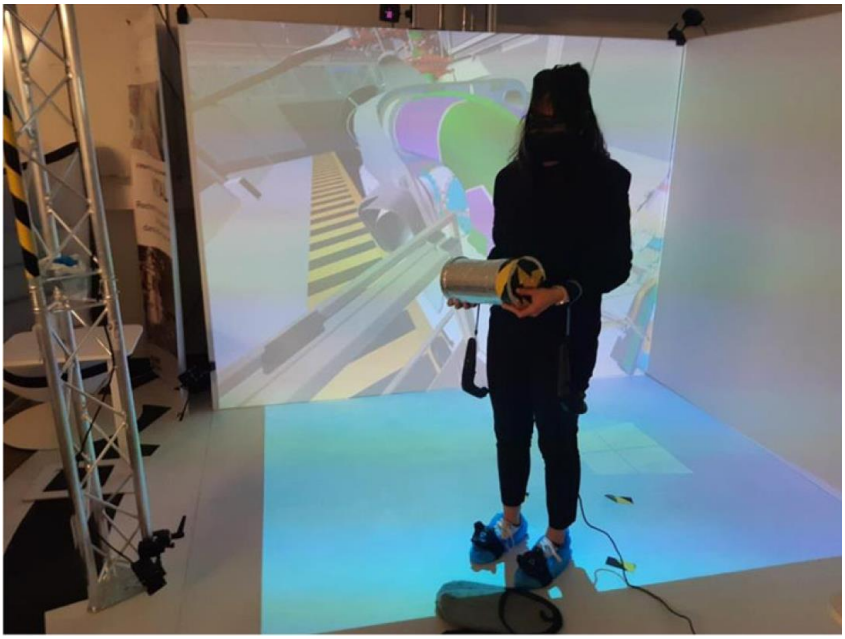


Figure 36: Plateforme de Réalité Virtuelle avec un étudiant simulant une tâche de maintenance.

La Figure 37 montre des étudiants manipulant un mannequin numérique dans un logiciel 3D afin de préparer la future simulation en réalité virtuelle.



Figure 37: Étudiants travaillant sur un logiciel de conception assistée par ordinateur pour préparer l'analyse des facteurs humains sur une plate-forme virtuelle.

- Soutenir et encourager l'utilisation des nouvelles technologies numériques, comme la réalité augmentée, qui est également de plus en plus largement utilisée dans les industries aéronautiques et à l'université. La complémentarité de l'utilisation des deux technologies digitales (réalité virtuelle et réalité augmentée) doit être explorée et appliquée ;

Dans un futur proche, il sera nécessaire d'évaluer de nouvelles technologies digitales à des fins de simulation, notamment pour identifier et diagnostiquer les risques en maintenance. Dans ce cadre, la collaboration industrielle doit être perpétuée pour garder une approche réaliste de l'apprentissage chemin (Carruth, 2017).

6. Synthèse et perspective

Les outils de simulation, qu'ils soient physiques ou digitaux, peuvent jouer divers rôles majeurs dans la prise en compte de l'EFH pour concevoir la maintenance. Même si historiquement, la simulation dans l'aéronautique a été longtemps dédiée à la conception des cockpits, depuis désormais une vingtaine d'années, la maintenabilité tente aussi de simuler pour mieux concevoir. Surtout, l'explosion des technologies immersives, a permis de donner un nouvel essor à l'usage de ces outils au sein même des bureaux d'études. Nous avons relevé et étudié trois approches au cours des 7 dernières années :

- La complémentarité des outils de simulation existants ;
- De nouveaux usages et des adaptations à des contextes socio-économiques différents tout en gardant le même objectif, mieux intégrer les EFH en maintenabilité ;
- La simulation comme support pédagogique pour mieux sensibiliser à la maintenance et à l'EFH, principalement auprès des non spécialistes pour faciliter leur communication future avec des ergonomes.

A cet égard plusieurs axes peuvent être étudiés dans le futur et seront développés dans le chapitre V :

- La notion d'acceptabilité est essentielle et doit passer par des phases pédagogiques pour faire comprendre les atouts, mais aussi les points faibles de l'outil de simulation (Loup-Escande & Loup, 2021 ; Sagnier et al., 2019). Cette logique doit passer par une amélioration des programmes pédagogiques dans les structures universitaires mais aussi en entreprise. Cette double voie doit permettre de former et de sensibiliser toutes les générations qui se croisent aujourd'hui au sein des entreprises ;
- Les outils de simulation digitaux (réalité virtuelle, réalité augmentée) ne sont aujourd'hui pas conçus à des fins d'usages dédiés à l'analyse des EFH. Il convient de poursuivre nos études pour connaître la capacité de chaque outil à étudier, qualitativement et quantitativement les situations de travail en maintenance ;
- Le point précédent doit aussi tenir compte de la croissance exponentielle des outils digitaux qui impose, en parallèle de nos études, de réaliser une veille permanente de la performance technique de ces outils. En effet, leur évolution peut apporter de nouvelles perspectives dans les usages que les ergonomes peuvent en faire.

7. Conclusion

Ce chapitre IV a étayé les outils de simulation qui sont le trait d'union entre les phases proactives et rétroactives évoquées dans les chapitres II et III. La complexité des situations de maintenance et les variabilités encore mal maitrisées imposent d'exploiter pleinement les outils de simulation afin d'anticiper au mieux les futures contraintes de opérateurs.

Néanmoins, l'articulation entre les chapitres II, III et IV n'est pas évidente dans un contexte industriel, il s'agira dès lors de l'étudier dans les années à venir. Le chapitre V suivant vise ainsi à proposer un plan, une stratégie assortie d'une temporalité pour guider nos futurs axes de recherche qui se poursuivent d'ores et déjà entre notre industriel et les différentes structures universitaires.

CHAPITRE V

SYNTHESE, PERSPECTIVE ET CONCLUSION

V. SYNTHESE, PERSPECTIVES ET CONCLUSION

1. Introduction

L'Ergonomie et les Facteurs Humains (EFH) restent une discipline qui peine à convaincre les ingénieurs-concepteurs, notamment dans sa prise en compte dès les phases de conception. Co-concevoir, pour et avec les opérateurs finaux, afin d'aboutir à un réel compromis entre les contraintes mécaniques et les exigences EFH relève toujours, et de manière récurrente, d'un combat lent en entreprise alors que les bienfaits sont reconnus par beaucoup d'acteurs-métiers en bureau d'études. De plus, la confusion entre plusieurs disciplines (UX, UI, ergonomie…) est de plus en plus ostentatoire. Nous assistons, par exemple, à la multiplication des « coachs » sans réelles bases théoriques ou à la volonté de faire de l'ergonomie un objet marketing sans mener d'études. Ainsi, nous pouvons constater un renforcement rapide de la croyance silencieuse induisant que l'ergonomie reste basée sur l'expérience personnelle, suffisant pour s'auto-proclamé « spécialiste » ne faisant dès lors qu'accentuer la scission entre ergonomes et ingénieurs-concepteurs. Mais, cette volonté affichée de vouloir faire de l'EFH doit être perçue positivement. A nous, ergonomes, de poursuivre le combat, de le recentrer, de faire valoir notre discipline scientifique. D'abord par les étudiants, en leur donnant les moyens de mieux communiquer, de mieux prouver la pertinence et l'utilité de cette discipline scientifique. Nous constatons trop souvent que les étudiants et les jeunes diplômés sont d'excellents diagnosticiens mais trop souvent en faiblesse quant aux propositions de solutions, cohérentes avec leur environnement et leur écosystème, notamment en bureau d'études. La prise en compte des contraintes techniques, mécaniques, des coûts… doit rentrer dans leur équation. Proposer une solution qui a du sens, c'est l'ouverture vers le dialogue entre acteurs-métiers de différents horizons et de différentes disciplines. En entreprise, c'est poursuivre la mise en place d'études EFH structurées et argumentées compréhensibles par des non spécialistes, leur permettant, d'une part de comprendre la démarche EFH et d'autre part de les faire adhérer aux solutions résultant de l'analyse EFH.

Ce manuscrit questionne tout particulièrement cette notion d'intégration des EFH au sein d'un bureau d'études aéronautique, dédié à la conception et l'amélioration de la maintenance. Il est intéressant de voir que cette conception peut influencer le design du système mais également les outillages de maintenance ainsi que les procédures. La mixité entre données relevant du monde des sciences de l'ingénieur avec le monde des sciences humaines et sociales est au cœur de notre problématique. La partie qui suit vise à synthétiser les différents chapitres avant d'entrevoir des perspectives à court, moyen et long terme.

2. Synthèse générale

2.1. Constats et besoins

Nos travaux de recherche, conduits depuis 2016, nous ont amené à produire une nouvelle vision de l'intégration des EFH au sein même d'un bureau d'études aéronautique, centrée sur la conception de la maintenance. Tout d'abord, cette volonté industrielle de mieux tenir compte des EFH vient d'un constat clair, connu et admis dans le monde aéronautique : la seconde cause des incidents et des

accidents aériens pour les hélicoptères a pour origine une erreur humaine pendant l'activité de maintenance (Saleh et al., 2019).

2.2. Phase proactive

La phase proactive se définit comme la phase de conception, là où l'activité de maintenance est imaginée, induisant des itérations entre différents acteurs-métiers du bureau d'études. Cet ensemble de personnes remonte de l'information jusqu'à venir impacter l'opérateur final lorsque le produit ou système sort des phases de conception pour être utilisé.

C'est dans cette phase proactive, et donc en bureau d'études, que nous avons initié nos travaux de recherche en 2016. Nos travaux ont montré que les acteurs-métiers en bureau d'études, pour la majorité d'entre eux sont spécialisés en mécanique et en conception et n'ont que très rarement suivi des formations ou des sensibilisations autour des EFH (Bernard et al., 2019). Nous avons aussi constaté que ces mêmes acteurs-métiers ont une réelle volonté de tenir compte d'exigences EFH mais sans réelles compétences. Cette intégration des EFH reste anarchique dans le temps, s'appuyant sur la simple expérience de l'ingénieur-concepteur et davantage orientée sur la dimension physique que sur la dimension cognitive et organisationnelle pourtant indissociables (IEA, 2000). Conscient que l'ergonome a du mal à trouver sa place auprès des ingénieurs-concepteurs, nos premiers travaux de recherche nous ont amenés à développer une démarche (PEAM – Preliminary Ergonomics in Maintainability) pour épauler les non spécialistes en EFH, sans pour autant se substituer à l'ergonome (Bernard, 2019 ; Bernard et al., 2023). Cette démarche permet de mieux exploiter les outils de simulation physiques et digitaux (Bernard et al., 2020) à des fins d'analyse des EFH. L'objectif étant d'apporter suffisamment de justification pour optimiser le compromis technique associant les critères mécaniques et les exigences EFH.

Cependant, cette démarche qui a montré son efficacité dans un contexte industriel (Bernard et al., 2022 ; Bernard et al., 2023) ne se focalise que sur la santé et la sécurité des opérateurs. De nouveaux travaux de recherche ont ainsi été entrepris, dans la même entreprise aéronautique, pour se focaliser, cette fois-ci, sur la notion des erreurs humaines en maintenance pouvant impacter la sécurité des vols (Murie, 2022). Ces travaux nous ont permis d'exploiter des connaissances existantes en les rendant applicables à notre domaine industriel, en maintenabilité. Plus particulièrement, l'auteur a développé une démarche se centrant cette fois-ci sur les erreurs humaines (CSR - Contraintes Stratégie Ressources). Elle vise notamment à favoriser les échanges entre les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité et les opérateurs en les confrontant, a posteriori, à des situations de travail réel de maintenance où la sécurité des vols a été mise en jeu. Par l'analyse de ces événements significatifs, la démarche CSR vise à fournir des données sur les contraintes que doivent gérer les opérateurs de maintenance pour réaliser la tâche de maintenance ; les stratégies opératoires mises en œuvre par les opérateurs pour agir en sécurité face à ces contraintes ; les ressources nécessaires pour réaliser ces stratégies. Cette démarche est effectuée sous la supervision d'un ergonome.

Que ce soit PEAM ou CSR, ces deux méthodes ont été développées pour être appliquées suivant deux contextes différents : (1) modification de design de l'hélicoptère, de design des outillages de maintenance ou de procédures de maintenance pendant les phases de conception d'un nouveau

produit/système ; (2) analyse d'un évènement (incident) a posteriori, pendant les phases de conception, pour confronter des opérateurs de maintenance et des ingénieurs-concepteurs à des situations critiques vécues. Ces données seront ensuite utilisées pour identifier des exigences de conception. Ces deux démarches peuvent avoir comme supports des outils de simulation (réalité virtuelle ou maquette physique). Dans un cadre industriel où la disponibilité des dispositifs de simulation peut être complexe, la démarche CSR propose de pouvoir aussi réunir ingénieurs-concepteurs et opérateurs autour d'une table avec des supports comme des plans, des photos, des modélisations 3D, qui rappelons-le, restent des objets intermédiaires de conception (Al Khatib, 2015).

Cependant, l'approche proactive ne permet pas d'être exhaustif quant à la compréhension des situations de maintenance futures. La simulation de l'activité en phase proactive, en maintenabilité, doit être appuyée par une meilleure compréhension des activités de maintenance.

2.3. Phase rétroactive

La phase rétroactive se définit comme la phase de compréhension de l'activité réelle pour redescendre l'information vers les bureaux d'études. Il existe deux grands axes :

- L'analyse de l'activité réelle de tâche de maintenance ;
- L'investigation des incidents et accidents.

Les études en santé au travail montrent bien la pénibilité de certaines activités, dont la maintenance. Il existe même des obligations envers les employeurs pour réduire la pénibilité, en particulier les troubles musculosquelettiques générés par les sur-sollicitations et des gestes répétitifs. Néanmoins, la maintenance aéronautique, même si elle impose des gestes complexes, ne sollicite pas toujours par répétition les membres supérieurs et inférieurs. En effet, la très grande diversité de tâches à réaliser chaque jour induit des gestes et de postures très différents (Chang & Wang, 2010 ; Lémonie, 2019). Pourtant, cette activité est reconnue pour être pénible avec un taux d'évènements au travail très élevé. La méconnaissance du terrain, de la variabilité des activités, des contextes, des tâches ne peut pas aider l'ingénieur-concepteur à concevoir une maintenance efficace, préservant aussi bien l'opérateur que l'hélicoptère.

Il convient donc de mener des études approfondies, par l'intermédiaire d'analyses objectives et quantifiées, permettant ainsi de créer un référentiel sur les difficultés que peut vivre, subir l'opérateur de maintenance. Nous avons ainsi mené des études (Bernard et al. 2021) mettant en avant que la dimension physique puisse influencer la dimension cognitive lors de l'activité de maintenance, susceptible de générer des erreurs sur des tâches d'apparence simple. Il est donc nécessaire de poursuivre des études de fond pour créer ce référentiel et ainsi influencer toute la chaîne du cycle de vie du produit pour que les contraintes liées à l'activité maintenance soient prises en compte. D'une part, cette prise en compte doit être le plus tôt possible dans le processus de conception, d'autre part il est aussi nécessaire que cette prise en compte ce maintienne de manière constante sur l'ensemble du cycle de vie du produit.

Connaître l'activité de maintenance est évidemment une source d'information pour l'ingénieur-concepteur en maintenabilité. Mais il existe une deuxième source tout aussi pertinente : l'analyse des

incidents et des accidents. Nous avons détaillé des modèles existants bien connus et très utilisés en aéronautique : le MEDA ou le HFACS. Ces modèles (comme d'autres), se focalisent davantage sur l'analyse des erreurs humaines 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 (Wiegmann & Shappell, 2001). La question qui peut ainsi être soulevée est le niveau de connaissance en EFH des utilisateurs de ces méthodes. En effet, même si la plupart de ces modèles ont la vertu d'être construits pour être utilisés facilement, sans connaissances fortes préalables en EFH, ils n'incitent pas à avoir une vue holistique d'une situation de travail et de voir plus loin que les seuls critères proposés par le modèle.

Ainsi, nous pouvons proposer un futur axe majeur de recherche en couplant les analyses liées à la sécurité et à la santé de l'opérateur ainsi que celles concernant les erreurs humaines. En accord avec nos travaux actuels, il semble essentiel de s'intéresser à :

- L'anticipation et la compréhension des erreurs par la simulation ;
- L'intégration dans les analyses d'évènements des notions de santé et de sécurité, notamment pour aider les non spécialistes en EFH.

Dans les deux cas l'enjeu est toujours le même : produire des recommandations, des méthodes, des guides… pour les bureaux d'études qui devront être respectés voire étendus aux autres aéronefs de technologie et/ou de situation de travail similaire. Nos travaux de recherche devraient donc continuer à se focaliser sur l'anticipation de l'activité afin de préserver la santé et de la sécurité des opérateurs, et ils pourraient être améliorés en vue de prendre en compte les erreurs humaines. De plus, pour tenter d'avoir une approche holistique, il conviendra de tenir compte de tous les facteurs influençant l'activité au travail : engagement, performance au travail, charge de travail… L'exhaustivité sera difficile à atteindre tant les variabilités sont fortes pour une même tâche de maintenance (en fonction du pays, de la culture locale, des organisations, des caractéristiques individuelles par exemple). Cependant, les protocoles d'analyse déployés devront tendre vers cette exhaustivité pour être le plus juste et le plus représentatif possible. Tendre vers l'approche holistique est d'autant plus important que les référentiels sur les difficultés des opérateurs de maintenance y seront dépendants.

2.4. Simulation et pédagogie

La simulation de l'activité en aéronautique a vu le jour au travers de l'activité de pilotage dès les années 1900. Pour l'activité de maintenance, à travers la maintenabilité, il faut réellement attendre les années 2000, pour commencer à voir des études sur l'anticipation et l'amélioration des conditions de travail d'opérateurs de maintenance dès les phases de conception. Nous retrouvons des études autour de l'accessibilité, de champ visuel et de zone d'atteinte. Les bureaux d'études maintenabilité se sont notamment emparés de ce sujet avec l'avènement des outils de simulation numérique comme la réalité virtuelle et augmentée, permettant aux simulations d'évoluer au rythme des itérations de projets de conception. Cependant, l'usage des outils de simulation numériques à des fins d'analyses EFH n'est pas encore totalement répandu, et l'usage pas toujours bien compris. Les études qui ont été menées au travers de nos travaux et de nos revues de littérature nous ont amenés à comprendre la complémentarité des outils de simulation existants, notamment entre les maquettes physiques et la réalité virtuelle (Bernard et al. 2019, Paquin & Bernard, 2023). L'émergence de la réalité augmentée

peut aussi venir compenser certaines simulations d'activités de maintenance ne pouvant pas être réalisées au travers des autres outils de simulation. Nous avons vu dans ce mémoire, par exemple, l'anticipation d'une activité d'inspection des moteurs, qui nécessité de grimper entre le sol et la partie haute d'un hélicoptère. Cet exemple a montré la limite de la réalité virtuelle mais compensé par l'usage de la réalité augmentée. Également, nous avons vu que la simulation permet de soutenir la pédagogie pour mieux sensibiliser à la maintenance et à l'EFH, principalement auprès des non spécialistes pour notamment faciliter leur communication future avec des ergonomes. Les travaux de recherche doivent se poursuivre pour assurer une acceptabilité (Loup-Escande & Loup, 2021 ; Sagnier et al., 2019) des outils en entreprise, notamment au travers de programmes pédagogiques dispensés aussi bien à l'université que dans les entreprises afin de toucher toutes les générations. Toutes ces études doivent bien sûr tenir compte de l'amélioration continue de toutes ces technologies, aussi bien sur le plan matériel que logiciel. Ces deux paramètres peuvent influencer le niveau de détail des simulations et l'interaction que l'on peut avoir avec, dégradant parfois la valeur écologique de la simulation. De ce fait, les caractéristiques intrinsèques des outils de simulation peuvent impacter l'objectivité d'une analyse EFH.

2.5. Modèle général et macroscopique de l'intégration de l'EFH en maintenabilité

Pour synthétiser nos propos, nous partageons la Figure 38 synthétisant l'ensemble des chapitres II, III et IV. Nous retrouvons ainsi deux approches :

Approche proactive *:*

La formation et le cursus universitaire sont les premiers leviers pour sensibiliser et former les ingénieurs-concepteurs à l'EFH. Nous distinguons, dans le processus de conception, deux phases en maintenabilité. La première concerne le développement de nouveaux produits et donc d'une nouvelle maintenance. Dans cette phase, l'anticipation de l'activité est totale. L'ensemble des outils de simulation, qu'ils soient digitaux ou physiques, est exploité au travers de méthodes telles que PEAM ou CSR. Nous distinguons ensuite une phase de maintenabilité en parallèle de l'activité réelle de maintenance, c'est-à-dire une fois que le produit a été déployé chez l'opérateur. Dans cette phase, des améliorations sont toujours possibles, qu'elle soit en lien avec l'approche rétroactive ou non. Les itérations sont régulières car ces améliorations restent confrontées aux retours d'expérience réguliers.

Approche rétroactive :

L'approche rétroactive se définit d'abord par les retours d'expérience des opérateurs de maintenance directement vers le constructeur et le bureau d'études maintenabilité. C'est également un élément important de capitalisation pour le développement de futurs produits et/ou hélicoptères. Le retour d'expérience en lien avec les enquêtes d'incidents et d'accidents est aussi prépondérant. Ces enquêtes impactent (1) la maintenance à court terme à travers la mise à jour de procédures de maintenance, (2) la maintenabilité et la maintenance à plus long terme avec le développement de corrections touchant le design, les outillages et (3) la capitalisation pour le développement de futurs produits, hélicoptères.

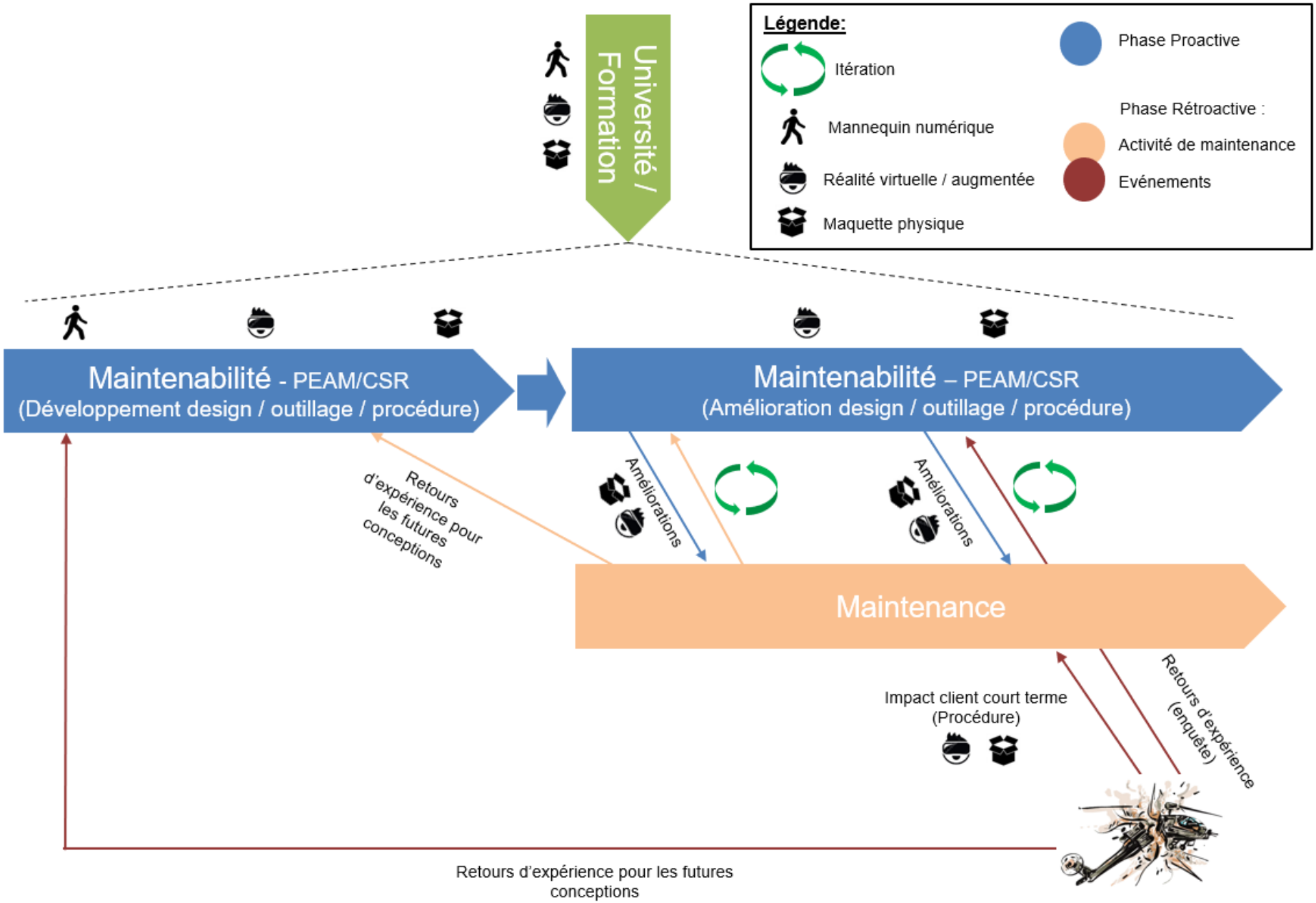


Figure 38: Proposition de processus global pour favoriser l'intégration de l'Ergonomie et Facteurs Humains en maintenabilité, tenant compte du cycle universitaire / de formation et du cycle de vie du produit dans son ensemble ainsi que des outils de simulation de l'activité.

3. Perspectives à court terme (2 à 4 ans)

3.1. Capitalisation et pédagogie / sensibilisation en entreprise : systématisation et rappel

Notre manuscrit fait ressortir deux axes majeurs : capitaliser sur les retours d'expérience du terrain et sensibiliser, former sur l'intérêt de l'EFH pendant les phases de conception. Notre travail s'est principalement focalisé sur le département maintenabilité. Néanmoins, nous avons aussi vu que la maintenabilité est en interface permanente avec tous les départements du bureau d'études afin d'optimiser le compromis entre les critères mécaniques et les exigences EFH. Les travaux de Dul et al. (2012) évoque d'ailleurs que les acteurs-métiers de la conception ont un fort pouvoir « d'influence » sur les décisions prises autour des choix conceptuels, mais qui ne vont pas toujours dans le sens d'exigence EFH, c'est-à-dire sans une réelle systématisation de recherche de compromis. Ainsi, deux axes d'amélioration ressortent et abondent dans le sens de notre étude :

- Renforcer la demande d'études EFH en formant tous les acteurs-métiers, et donc les non spécialistes en EFH ;
- Renforcer la formation des ergonomes pour encore améliorer et renforcer la qualité des analyses EFH.

Cette approche pourrait aussi aller dans l'autre sens : former et sensibiliser les ergonomes au monde de la conception. Si chaque partie prenante est sensibilisée aux contraintes de chacun, à l'intérêt de chaque discipline et à son impact pour l'opérateur, nous pouvons supposer que la recherche de compromis n'en sera que plus efficace et favorable.

Au sein de notre industriel, plusieurs axes sont en cours de développement pour répondre à cette nécessité d'impacter tous les acteurs-métiers du bureau d'études, au-delà du département maintenabilité. Nous listons ici l'ensemble de ces axes tout en synthétisant l'information pour ne pas enfreindre la confidentialité industrielle.

- Capitaliser les connaissances au travers de règles métiers partagées au sein d'une plateforme qui s'apparente à un Wikipédia dédié aux bureaux d'études ;
- Insertion de check-list pour que les non spécialistes en EFH puissent s'assurer qu'ils ont bien vérifié la conformité de leur étude vis-à-vis des règles EFH ;
- Insérer des check-lists EFH dans les modèles de documents techniques, pour aider les acteurs-métiers d'autres départements du bureau d'études à tenir compte de certains éléments EFH. En effet, ces documents techniques pourront impacter la rédaction des procédures de maintenance livrées aux clients. Par exemple, penser à mettre des figures du point de vue de l'opérateur lorsqu'il sera autour de l'hélicoptère, préciser les moyens matériels à exploiter pour réaliser des tâches de maintenance spécifiques ... Ces ajouts permettront de gagner du temps dans la rédaction de la procédure de maintenance et d'éviter des oublis d'informations ;
- Former au travers de sessions dédiées les acteurs-métiers. Ces sessions ne sont pas obligatoires et s'effectuent avec maximum 20 participants. Elles comportent notamment une

partie entièrement dédiée aux Facteurs Humains en maintenance, comment l'intégrer en phase de conception. Des exemples factuels y sont également présentés montrant, par exemple, des recommandations EFH sur l'architecture de l'hélicoptère impactant positivement l'activité de maintenance du client.

Ces approches industrielles doivent désormais être éprouvées et évaluées pour continuer à être améliorées. Des travaux de recherche devront être établis afin de réaliser un suivi sur le long terme. D'une part de l'usage qui est fait de ces approches, pouvant varier en fonction des métiers, des départements, du niveau de connaissances, du type de projet etc. D'autre part, il sera utile de voir le réel impact de ces approches sur les projets et ce que l'opérateur perçoit réellement, en comparaison aux précédentes méthodes.

3.2. L'anticipation des erreurs humaines par la voie de la simulation

Nos travaux de recherche nous ont permis de développer des méthodes et des outils associés directement applicables au sein du bureau d'études maintenabilité d'Airbus hélicoptères (Bernard, 2019). Plus particulièrement, l'ensemble des acteurs-métiers du département de maintenabilité, même les non spécialistes, peuvent désormais réaliser une première analyse EFH pour les aider dans leur conception. Mais cette analyse ne traite que de la dimension physique de l'EFH (santé et sécurité des opérateurs). Ainsi, une thèse de doctorat sous convention CIFRE, dans le même département maintenabilité, a aussi permis de gagner en compétences notamment dans l'analyse et la compréhension des erreurs de maintenance (Murie, 2022). Néanmoins, il manque deux maillons en proposant d'une part, à l'ensemble des acteurs métiers une démarche commune permettant d'évaluer à la fois la dimension physique, organisationnelle et cognitive, et d'autre part en continuant à étudier la complémentarité des outils de simulation à des fins d'analyses de l'EFH.

C'est dans ce cadre qu'une nouvelle thèse CIFRE est en cours, menée par Lorrys Berthon en collaboration avec l'ENSAM de Laval. Deux axes de recherche sont étudiés en accord avec les observations précédentes et les manques persistants pour optimiser davantage l'intégration de l'EFH en maintenabilité :

1. Optimiser l'usage des outils digitaux, et notamment des technologies émergentes qui se démocratisent, comme la réalité virtuelle, la réalité augmentée et surtout la réalité mixte. La réalité augmentée et la réalité mixte sont de plus en plus étudiées et développées à des fins d'applications industrielles. Elles se définissent 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 ou de réalité mixte, à la différence de celles de réalité virtuelle, ne visent pas une substitution totale du monde réel par une analogie virtuelle. Par exemple, 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), déjà évoquée en chapitre III (Paquin et Bernard, 2022).

Dans le monde industriel, cette technologie trouve sa place dans sa complémentarité avec les technologies de réalité virtuelle. Nous avons vu à travers les premiers travaux de recherches bibliographiques et nos usages au sein même de notre industrie 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., 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) ou interfaces tangibles (Israel, 2006). 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. De plus, la Réalité Augmentée commence à être utilisée de plus en plus comme une solution de maquettage virtuel permettant d'accélérer les cycles de développement (Fleury & Richir, 2021), par exemple en fabriquant des maquettes simplifiées simulant les appuis & interfaces tangibles pour l'opérateur et complétées par un hologramme lorsque aucune interface tangible n'est requise (Jin et al., 2007 ; Dyck et al., 2020).

En maintenance, les industriels commencent à exploiter la Réalité Augmentée 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 voies 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). La première voie, 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 (Gavish, et al., 2015). La deuxième voie 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 dans les procédures, 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). Concernant la voie de la réparation, elle trouve

sa place entre la voie de la substitution à la documentation et la dernière voie, celle de l'inspection.

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 EFH, au même titre que nous l'avons fait pour la réalité virtuelle. C'est en ce sens, d'ailleurs, qu'un premier travail nous a montré la potentielle efficacité de la réalité augmentée pour palier à certaines limites lors de simulations en réalité virtuelle à des fins d'analyses EFH (Paquin et Bernard, 2022).

2. Les travaux de recherche menés entre 2019 et 2022 (Murie, 2022) se sont focalisés sur la notion d'erreurs humaines, la perception qu'ont les acteurs-métiers en bureaux d'étude sur la réalité de l'activité de maintenance et sur la façon de sensibiliser ces derniers pour mieux concevoir. Nous savons que 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 à tous ces facteurs. Ainsi, nous pouvons proposer un futur axe majeur de recherche 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 ;
    - Une meilleure compréhension et prise en compte de la diversité du travail en maintenance.

    Ces travaux pourront, et devront s'appuyer sur la capitalisation des études menées au travers du HHA (Human Hazard Analysis) évoquée en chapitre III et qui a permis dans notre cadre industriel d'évaluer plusieurs centaines de tâches de maintenance, constituant un socle de connaissances important. La capitalisation des erreurs identifiées, avec les recommandations associées, sur les différents appareils, est une source essentielle, d'autant que la plupart des études sur les erreurs humaines en maintenance se focalisent sur les avions (Graeber & Marx, 1993 ; Shanmugam & Robert, 2015) et non sur les hélicoptères.

Dans les deux axes de recherche, l'enjeu est d'aider les bureaux d'études en fournissant des recommandations qui devront être respectées voire étendues aux autres aéronefs de technologie et/ou de situations de travail quasi-similaires.

3.3. Résilience et adaptation en cas de crise pour rester efficient dans l'analyse EFH

La crise sanitaire liée à la « COVID-19 » est un facteur exogène qui a bouleversé les processus de préparation des analyses EFH, impactant et fragilisant le secteur industriel (Belhadi et al., 2021 ; Spieske & Birkel, 2021). Nous avons vu dans le chapitre IV son impact sur la préparation des analyses EFH (Bernard & Loup-Escande, 2023). Cependant, la crise COVID n'est pas la première à avoir perturbé des organisations. D'ailleurs, une crise, au regard de sa racine étymologique d'origine grecque « Krisis », signifie « jugement », « décision ». La crise est donc considérée comme une étape au cœur d'un processus, pour lequel il est temps d'acter une évolution, en faisant le bilan de ce qui s'est passé et de ce qui se passe pour ainsi mieux se projeter vers l'avant, vers le futur. Ainsi, toute crise, qu'elle soit d'ordre économique, politique, médical ou encore industriel, constitue le paroxysme d'un processus qui ne fonctionne plus et doit engendrer des solutions, souvent sous forme de changement. Une crise peut être considérée comme « bonne » si les changements qui en découlent ont un impact positif sur le fonctionnement du nouveau processus et sur les personnes qui y sont impliquées. Par exemple, en termes de changement au travail nous pouvons citer la crise du pétrole dans les années 1970. Cette crise a été l'initiatrice de la mise en place du travail à distance, depuis son domicile, pour certains employés, dédiés à certaines fonctions (Torten et al., 2016). Cette forme de travail n'a, à cette époque, pas durée et est restée marginale. Cependant, avec le développement croissant et rapide des technologies, la crise sanitaire du SRAS en 2003 a relancé ce mode de travail à distance, aussi appelé télétravail. Cette crise a ainsi été l'une des premières à engendrer le travail à distance de masse (Tremblay, 2020). A l'époque, les habitudes de travail à distance avaient permis de rédiger de nombreuses études sur les limites et les avantages de cette nouvelle organisation du travail (Mann & Holdsworth, 2003 ; Kowalski & Swanson, 2005). Sans qu'elle ne se pérennise à grande échelle à la suite de cette crise sanitaire, cette nouvelle organisation a tout de même permis de gagner en réactivité pour la gestion des crises qui ont suivi comme celle du H1N1 (Torny, 2012). Le télétravail s'est alors progressivement imposé comme une solution évidente, s'intégrant parfaitement dans les plans de continuité, assurant ainsi l'activité économique qui reste prioritaire (Torny, 2012). De plus, lorsque la confiance entre l'employeur et l'employé est totale, ce dispositif s'inscrit dans les nouveaux modes de travail qui se veulent plus performants, en évitant les temps de transport par exemple (Bouzou & de Funès, 2018).

C'est dans ce contexte de résilience qu'une réflexion doit s'ouvrir. En effet, entre la crise H1N1 et la crise COVID il s'est écoulé 8 ans, et le télétravail n'était pas devenu une norme partout, en tout cas, il restait répandu de manière très hétérogène. Ainsi, nous pouvons constater une forme de résilience évidente à chaque crise pour mieux s'organiser mais la capitalisation et le changement à long terme ne semblent pas toujours acquis. Nous pouvons dès lors nous questionner sur la pérennisation de certaines solutions découlant de crises et qui, pour certaines d'entre elles, peuvent exister au-delà de la crise.

Dans notre cas, plusieurs questions émergent. Comment la démarche EFH peut-elle rapidement s'adapter pour poursuivre l'adaptation du travail, quel que soit le contexte d'une crise, de l'entreprise et des difficultés qu'elle peut rencontrer ? Le digital peut-il pallier le manque d'accès au terrain, pour préparer les analyses EFH voire réaliser certaines simulations ? Nous voyons de plus en plus que le

digital est un moyen de supporter les entreprises mais en aucun cas cela doit venir remplacer l'expertise d'un ergonome. L'ergonome doit garder une place centrale pour porter, contrôler, sensibiliser voire corriger sur les dérives potentielles qui peuvent être faites, involontairement, par des non spécialistes en EFH.

4. Perspectives à moyen terme (4 à 8 ans)

4.1. Capitalisation et référentiel du travail réel en maintenance

Le premier axe d'amélioration à moyen terme sera la capitalisation au travers d'analyses approfondies, par l'intermédiaire d'études objectives et quantifiées, permettant ainsi de créer un référentiel sur les difficultés que peut vivre et subir l'opérateur de maintenance. Comme évoqué dans ce manuscrit, nous avons mené une première étude scientifique dédiée mettant en lumière l'étroit lien entre la charge physique et la charge cognitive (Bernard et al., 2021), en précisant que des tâches simples d'un point de vue cognitif deviennent complexes avec génération d'erreurs lorsqu'un effort physique y est associé. D'autres études industrielles (chapitre III) ont aussi montré l'importance de bien identifier toutes les caractéristiques humaines comme le champ visuel ou le sens du toucher pour concevoir des tâches de maintenance parfaitement réalisables. Mais ces études approfondies nécessitent du temps et des moyens lourds que seule la recherche peut être en capacité de déployer, de maîtriser dans le temps. Cette double temporalité, court terme pour l'industrie et long terme pour la recherche, n'est pas toujours compatible, et la mise en place de contrats de recherche intégrés à l'industrie, comme les contrats CIFRE, ne peuvent pas toucher tous les sujets d'une industrie. Dès lors, une question se pose : comment l'industrie peut-elle capitaliser rapidement sur la pénibilité du travail en maintenance ? Les réponses existent déjà en partie, mais la solution n'est que trop rarement déployée au sein des industries car souvent vue comme complexe et longue à mettre en place. Plusieurs exemples sont évoqués ci-dessous pour avancer dans la réflexion.

Un travail de recherche mené en 2017 au sein d'une industrie pharmaceutique, Merck Millipore présente un système permettant une évaluation ergonomique en temps réel des tâches manuelles en milieu industriel (Vignais, Bernard et al., 2017). Tout d'abord, un modèle biomécanique du haut du corps a été développé en utilisant des capteurs inertiels placés à différents endroits sur le haut du corps. Sur la base de ce modèle, une évaluation ergonomique informatisée RULA (McAtamney & Corlett, 1993) a été mise en place pour permettre une évaluation globale du risque de troubles musculosquelettiques en temps réel (Figure 39).

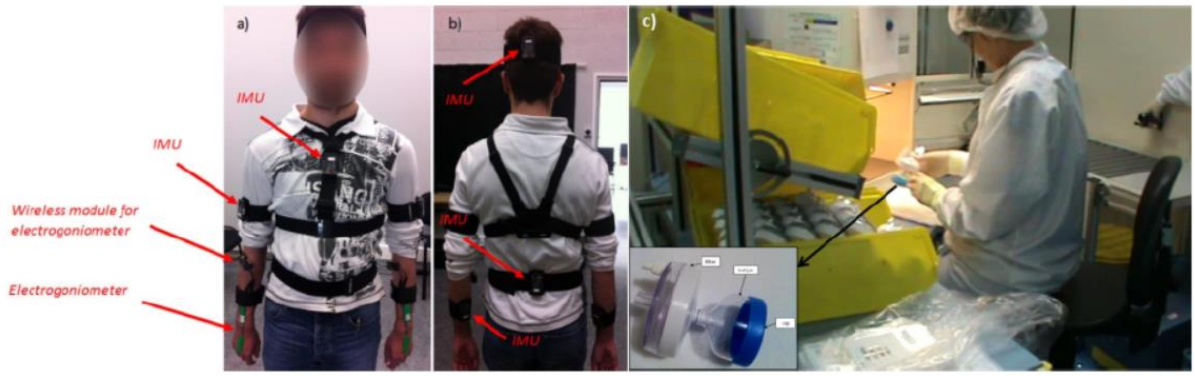


Figure 39: Localisation des centrales inertielles sur le corps et descriptif du poste de travail appelé « nettoyage des filtres ».

Ainsi, cette évaluation ergonomique basée sur des capteurs corporels synchronisés avec des enregistrements vidéo a permis une analyse plus approfondie de chaque sous-tâche composant le cycle de travail. Ainsi, chaque sous-tâche a été associée à : un score RULA moyen, des pourcentages de temps passé à chaque plage RULA, un score local par articulation/segment et des pourcentages de temps que chaque articulation/segment a passé à un niveau dangereux. Ces résultats permettent de rapidement diagnostiquer les difficultés physiques et organisationnelles de l'opérateur et ainsi de dégager des solutions d'amélioration. Par exemple, dans cette étude, en termes de préconisations ergonomiques, le futur poste de travail devrait idéalement réduire les mouvements des avant-bras (en diminuant l'espace de travail et la position des éléments utiles par exemple) et des mains (en adaptant la hauteur du poste de travail à chaque opérateur par exemple). De plus, les scores RULA les plus élevés ont été obtenus pour certaines sous-tâches pour lesquelles les avant-bras restent en extension de manière prolongée dans le temps.

Ces travaux de recherche présentés comprennent la modélisation, la détection, l'analyse et l'évaluation des étapes de l'approche de l'EFH. Sur la base d'un certain modèle biomécanique (le haut du corps humain dans Vignais, Bernard, et al., 2017), différents types de capteurs sont sélectionnés (IMU et électro-goniomètres) afin de calculer un risque d'exposition (RULA global et local scores dans le temps) au cours de l'activité professionnelle. Ce risque d'exposition est comparé entre les sous-tâches pour évaluer les différences relatives d'exposition biomécanique. Ainsi, cette méthodologie a permis de développer des métriques ergonomiques innovantes (scores RULA locaux) pour identifier les facteurs de risque a posteriori. Cette identification pourrait servir de données d'entrée pour des recommandations EFH, d'une part afin de repenser le poste de travail, et d'évaluer l'impact d'une modification des processus associés à l'activité professionnelle et, d'autre part, d'apporter au bureau d'études une compréhension claire de ce qui ne marche pas dans un design existant d'un point de vue de l'utilisabilité et du rendement de production. Il existe désormais des outils permettant de traquer les mouvements du corps humain sans l'ajout de capteurs inertiels. Il y a plusieurs systèmes de suivi de mouvement du corps disponibles sur le marché qui sont basés sur différentes technologies, par exemple : Captiv T-sens Motion (TEA, Nancy, France), Xsens DOT (Xsens Technologies BV, An, Pays-Bas) et Kimea (Moovency, Saint-Jacques-de-la-Lande, France). Ces mêmes logiciels permettent aussi d'enregistrer de nombreuses données physiologiques (mouvements, accélération, mesure de force, électromyographie de surface, ECG, etc.) (Mostosi et al., 2022).

Nous pouvons aussi citer des études dans le secteur automobile qui cherchent à intégrer le « bien-être des conducteurs » comme critère dans la conception des véhicules (Bertin et al., 2018). Cette approche est aussi plus communément appelée « Design for Well-Being » – qui fait écho au « Design For X » évoqué en chapitre II – dans le processus de conception d'un véhicule automobile. Pour assurer l'intégration de l'EFH, l'industrie automobile développe et déploie ainsi des moyens d'évaluation objectifs permettant de concevoir, intégrer et évaluer le bien-être dans l'automobile. Plus particulièrement, la mesure physiologique est décrite comme efficace même dans un cadre industriel pour faire « bon du premier coup » dans les choix architecturaux. Globalement, la donnée physiologique est d'autant plus importante qu'elle objective non seulement la dimension physique de l'opérateur mais également la dimension cognitive.

En maintenance, il convient aussi de rendre objective la mesure de la charge cognitive ce qui est très rarement fait. En effet, en industrie, la charge cognitive est très souvent évaluée au travers de questionnaires comme le NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988), CLAM (Thorvald et al., 2019) ce qui permet d'évaluer la charge cognitive perçue par l'opérateur (mesure subjective). Or, la charge cognitive perçue n'est pas toujours représentative de la charge cognitive réelle qui ne peut se mesurer que par des mesures physiologiques (mesure objective). Néanmoins, l'analyse physiologique de la charge cognitive ne peut pas être traitée seule, puisque des sous-dimensions de la charge cognitive comme l'effort physique, le stress ou encore la fatigue peuvent provoquer des manifestations physiologiques très similaires (Parent, 2019). Il conviendrait donc de coupler des études mêlant des analyses subjectives (questionnaires) et des analyses objectives (mesures comportementales comme le temps de réaction, mesures physiologiques).

Il faut donc poursuivre l'intégration de méthodes et d'outils assurant des mesures objectives, les moins invasives possibles, dont la mise en œuvre est rapide avec une interprétation des résultats faciles. Mais il faudra, quoiqu'il arrive, assurer la lecture des résultats par des spécialistes en EFH. Ce travail à impact industriel direct ne doit en aucun cas balayer le travail de fond de la recherche qui doit poursuivre une veille technologique, le développement de moyens, d'outils, de processus mais aussi de capitalisation en déployant ponctuellement des moyens plus complexes à mettre en œuvre. Mais cette complémentarité évidente du couple recherche/industrie doit aussi faire l'objet d'un travail de réflexion dans le futur, qui plus est autour des EFH, pour que l'articulation entre la recherche et l'industrie devienne évidente et naturelle.

4.2. Favoriser le travail collaboratif, entre ergonomes dédiés à la conception de la maintenance

Au sein de notre industriel, nous avons depuis 8 ans mené de nombreuses analyses EFH sur des tâches de maintenance dites sensibles. Ces analyses touchent des tâches ayant été à l'origine d'un évènement (incident ou accident) ou des analyses conduites pendant le développement d'un nouveau produit, à l'image de notre étude menée sur des tâches sensibles et résumée en chapitre III (Bernard et al., 2023). Toutes ces analyses sont menées par les ergonomes du service maintenabilité qui émettent des recommandations auprès des acteurs-métiers du bureau d'études, dont certaines dédiées à l'amélioration de la procédure de maintenance. Cependant, nous avons observé, à travers des retours clients, que la procédure de maintenance souffre parfois d'incompréhension, de manque

d'informations par exemple, ayant pour conséquence un risque d'erreurs de maintenance (Rostamabadi et al., 2019). Pour améliorer la procédure de maintenance, un spécialiste EFH est arrivé il y a quelques années au sein du service documentation technique se focalisant sur l'optimisation des règles d'écriture. Cependant, malgré sa présence, on peut observer un manque persistant d'informations dans la procédure de maintenance notamment d'un point de vue technique qui ne relève ainsi pas de la manière de rédiger. Afin d'améliorer le processus, une vaste expérimentation a alors été réalisée dans l'industrie des hélicoptères.

C'est dans ce cadre qu'une première coopération de terrain a été déployée pour réaliser une campagne d'analyses EFH. Cette campagne a été menée par deux spécialiste EFH : l'un venant du département maintenabilité formé et habitué au processus d'analyses de l'activité ; l'autre spécialiste EFH venant du département rédigeant la documentation technique et également formé à l'analyse de l'activité. L'analyse consistait à évaluer les cartes de travail directement sur hélicoptère afin d'effectuer une analyse EFH pour s'assurer que la conception de la maintenance était adéquate (accessibilité, visibilité, difficulté, etc.) et que la conception des procédures était également appropriée (séquence, lisibilité, disponibilité des informations, compréhension, langage, boucles, chaînons manquants, ergonomie des interfaces, etc.).

Les premiers résultats montrent que de nombreuses catégories de recommandations sont respectivement vérifiées soit par le spécialiste EFH en maintenabilité, soit par le spécialiste EFH en documentation technique. On peut expliquer ce constat par la variabilité des compétences et connaissances incluses dans la définition du champ de l'EFH (Meister, 2018 ; Proctor 2018). Dans notre cas d'étude, le spécialiste EFH en documentation technique est plus à l'aise avec la linguistique, la psychologie ou la cognition entre autres, alors que le spécialiste EFH en maintenabilité est plus à l'aise avec la dimension physique et l'intégration de l'EFH dans le processus de conception (Waterson & Kolose, 2010 ; Bernard et al., 2019 ; Rae et al., 2020). Nous avons aussi observé que certains types de recommandations sont communs, mais les recommandations réellement adressées par chaque département sont différentes. Par exemple, pour la catégorie "Éviter la multiplication des « Avertissements » dans les procédures pour s'assurer qu'elles soient lues par les utilisateurs", l'équipe de maintenabilité adressera une recommandation au bureau d'études pour simplifier certains critères de conception afin d'éviter le risque, tandis que la documentation technique s'assurera que l'avertissement adressé soit vraiment un avertissement ou ne peut pas être simplifié en ajoutant une sous-tâche pour aider l'opérateur à effectuer les tâches en toute sécurité.

Ce travail, qui a fait l'objet d'une première publication (Bernard et Jahchan, 2024), met en avant la nécessité de continuer à mieux faire collaborer les ergonomes de différents départements. Car, dans le fond, ils travaillent pour la même cause : favoriser une activité de maintenance sûre et facile, aussi bien pour protéger l'opérateur lui-même que préserver l'intégrité de l'aéronef. Il conviendra donc de poursuivre la mise en place de processus favorisant la collaboration entre ergonomes. En parallèle, il faudra assurer la communication vers les non spécialistes qui restent, toujours et encore, l'enjeu le plus important pour assurer le meilleur compromis entre critères techniques et exigences EFH.

5. Perspectives à long terme (> 8 ans)

5.1. Garder le contrôle de la discipline de l'Ergonomie et des Facteurs Humains

La réussite des objectifs à court et moyen terme doit permettre de mettre en place des processus, des outils d'analyses et d'apporter une connaissance globale des outils de simulation. Également, ce travail doit apporter une connaissance globale de ce qu'est réellement la maintenance. Tout ce travail et les résultats associés devront s'insérer dans un environnement de bureau d'études où la majorité des acteurs-métiers sont des ingénieurs-concepteurs et non des ergonomes. Au travers de nos travaux, nous avons évoqué à plusieurs reprises la notion d'acceptabilité de démarches et d'outils que nous avons développés et/ou implémentés dans les processus du bureau d'études. Le développement et l'apport de nouveaux outils autour de l'EFH dans un environnement composé majoritairement de non spécialistes est aussi un réel risque de perte de maîtrise de l'ergonome. Même si ces démarches et outils sont associés à des sensibilisations et formations, ils ne se substituent jamais au rôle de l'ergonome qui doit garder un regard, voire reprendre le sujet si l'approfondissement est nécessaire. En parallèle, il convient d'optimiser l'équilibre entre le nombre d'ergonomes disponibles en fonction du nombre d'analyses à réaliser. Pour aider le non spécialiste en EFH, par exemple, l'usage de l'outil de PEAM (Bernard et al., 2023) précise bien dans certaines étapes de validation que l'analyse de l'ergonome doit être systématique avant de poursuivre le développement de solution. L'ergonome doit décider de laisser l'ingénieur-concepteur poursuivre ou de reprendre le sujet pour l'approfondir. Cependant, avec le temps et au travers des sensibilisations voire des formations, le non spécialiste peut être en sur-confiance et ne plus passer par l'ergonome quand le besoin s'en fait sentir. Ce phénomène est connu, a été généralisé et décrit sous le nom de « l'effet Dunning-Kruger » (Kruger & Dunning, 1999). Les auteurs décrivent un phénomène que nous pouvons vivre en bureaux d'études, là où les connaissances en EFH ne sont pas toujours perçues comme une « vraie » science et peuvent se baser sur la propre expérience personnelle. Même si cette étude a souvent été critiquée, une autre étude publiée en 2011 tend à renforcer ce potentiel effet (Dunning, 2011). Globalement, les études expliquent que le manque d'expertise et de connaissance est souvent mal perçu par l'individu, surtout que le manque de connaissance est souvent invisible. Ce manque se cache souvent dans le domaine des « inconnues inconnues » où les quelques connaissances acquises dans un domaine semblent suffire pour mener à des conclusions. Cette inconscience de l'insuffisance de connaissances empêche également la reconnaissance de ce manque lorsqu'ils sont face à des spécialistes.

Nos travaux, depuis 2016 et dans le futur, ont pour vocation à aider des non spécialistes en EFH, au travers de démarches, d'outils, de règles métiers et de sensibilisation. Mais le partage à grande échelle peut aussi entrainer une perte de contrôle de la part de l'ergonome en termes de suivi des nombreux sujets. Ainsi à long terme, il sera nécessaire de vérifier que les dérives seront les plus faibles possibles et lorsqu'elles seront établies, y remédier. Par exemple, la démarche PEAM a été en développement pendant trois ans spécifiquement pour s'adapter dans le département maintenabilité, à ces processus et aux acteurs-métiers. C'est donc un outil sur-mesure. Ainsi, pour garder le contrôle des EFH et placer le « curseur » au bon niveau sur ce qui peut être réalisé par des non spécialistes ou non, il sera essentiel d'accompagner chaque département pour adapter les processus, les outils et le niveau de

connaissances. Il ne s'agit pas d'éviter « l'effet Dunning-Kruger » qui est naturel, mais de le contrôler pour que, de manière générale, l'apport des EFH reste efficace et efficient afin que le développement de produits, systèmes, soit optimal pour le futur opérateur.

5.2. Maîtriser la diversité et la variabilité des connaissances des outils de simulation digitaux

En parallèle du contrôle des connaissances en EFH diffusées au sein des bureaux d'études, il convient de regarder à long terme, le niveau de connaissances des outils de simulation digitaux. Au cours de ces dernières années nous avons constaté que l'usage des outils de simulation, à des fins d'analyses EFH, n'était pas acquis par tous les acteurs-métiers. Il existe des disparités au sein même de la communauté des ergonomes. En effet, la croissance et l'évolution « exponentielle » de ces technologies peut créer un écart entre les techniques nouvelles (applications, interactions virtuelles…) et les usages qui peuvent en être réellement fait pour réaliser des analyses EFH. Ainsi, il convient d'homogénéiser le niveau de connaissance entre les utilisateurs, en termes de performance des outils de simulation mais aussi de leurs limites. Le niveau de connaissance, ainsi que d'appétence de technophilie, peuvent varier entre les générations, tant la croissance des outils digitaux a été fulgurante depuis 1980. Néanmoins, Fleury et Richir, 2023, suggèrent que le fossé générationnel creusé entre les jeunes générations, davantage habituées à l'usage et au monde numérique, et les anciennes générations est en train de se réduire, notamment autour des technologies de l'information et de la communication. La conception centrée utilisateur de toutes les interfaces, qu'elle concerne les usages pour le loisir ou le professionnel, a permis à tous les utilisateurs de s'adapter, de comprendre et de s'approprier les nouveaux outils digitaux. Fleury et Richir, 2023, p. 1, supposent même « que le fossé des générations numériques a peut-être été une parenthèse dans l'histoire liée à la démocratisation des premiers ordinateurs compliqués dans les années 80 ». Mais la question générationnelle n'est pas le seul frein. En effet, en supposant que le palier du niveau de connaissance devient quasiment nul entre les générations, il restera un écart spécifiquement pour l'analyse des EFH. Les outils de simulation digitaux ne sont pas développés (que l'on parle du matériel ou du logiciel) pour l'analyse des EFH mais pour d'autres usages bien plus répandus et « vendeurs » dans le monde industriel. En mettant de côté la notion de « jeu », une étude a mis en évidence trois grands domaines d'usage de la simulation numérique en industrie (Fleury et al., 2023) : tester un procédé, concevoir un produit et entraîner. Même si quelques études traitent de l'analyse EFH (Bernard et al., 2019), il convient de mettre en avant que l'industrie utilise surtout des dispositifs immersifs à des fins de collaborations entre spécialistes de la conception. Cela induit que l'analyse EFH au travers des outils de simulations devra continuellement faire l'objet d'études préalables pour connaître les limites et les avantages de chaque outil de simulation. Un socle de connaissances, sous forme de référentiel, doit donc être établi pour mieux anticiper, non pas le développement des futures technologies immersives, mais les usages pour réaliser des analyses EFH. Nous parlons ici de maîtrise technique pour assurer une validité écologique de la simulation la plus élevée possible. Sans connaissance de la validité écologique, notamment dépendante d'outils de simulation utilisés, aucune interprétation et conclusion ne peut être réalisée.

6. Conclusion

Ce travail de HDR synthétise l'ensemble des travaux menés depuis 2016 entre le monde industriel et le monde universitaire. En effet, la thèse CIFRE menée entre Airbus Hélicoptères et l'Université de Technologie de Belfort–Montbéliard s'est concrétisée par une poursuite des travaux de recherche. D'abord, cette collaboration s'est poursuivie entre les deux entités citées ci-dessus (statut de chercheur associé), puis avec Aix-Marseille Université (enseignements et recherche), le CNAM de Paris pour le suivi d'une thèse CIFRE entre 2019 et 2022 (Murie, 2022), ainsi qu'avec l'ENSAM de Laval pour un nouveau contrat CIFRE débuté en mai 2023.

L'ensemble des partenariats et travaux associés se sont centrés sur l'intégration de l'Ergonomie et des Facteurs Humains (EFH) en maintenabilité, au travers des outils de simulation. Nous avons particulièrement travaillé sur trois axes :

- Optimiser la prise en compte des EFH pendant les phases de conception, dans un bureau d'études dans lequel la majorité des acteurs-métiers ne sont pas des spécialistes en EFH. L'objectif est de mieux concevoir pour améliorer l'activité de maintenance future ou existante (de la maintenabilité vers la maintenance, phase proactive) ;
- Optimiser le retour d'expérience de l'activité de maintenance vers le bureau d'études maintenabilité (phase rétroactive). Cela tient compte de l'analyse des évènements (incidents ou accidents) mais également d'une veille et d'études approfondies continuelles pour capitaliser sur la pénibilité de l'activité de maintenance ;
- Optimiser l'usage des outils de simulation ; notamment digitaux, pour réaliser des analyses EFH avec une forte validité écologique (faible écart entre activité simulée et activité réelle). Les phases proactives et rétroactives sont étroitement liées à la simulation. D'une part, elles permettent de mieux percevoir l'activité de maintenance quelle que soit la phase et d'autre part elles jouent un rôle pédagogique très fort envers les populations provenant des bureaux d'études souvent éloignées du terrain et peu sensibilisées à l'EFH.

Ce manuscrit nous amène finalement à proposer plusieurs axes de recherche dans le futur, à court, moyen et long terme, pour notamment accroître la connaissance de l'activité réelle des opérateurs de maintenance en aéronautique et mieux intégrer l'EFH pendant les phases de conception dans l'ensemble du bureau d'études. Nous relevons huit axes principaux :

- **Capitaliser davantage et accroître les démarches pédagogiques** au sein des entreprises pour sensibiliser l'ensemble des acteurs-métiers du bureau d'études à l'EFH mais également à l'activité réelle des opérateurs de maintenance à des fins de mieux concevoir.
- **Comprendre l'impact de la dimension cognitive**, pouvant induire les erreurs humaines. C'est d'autant plus important qu'au sein des bureaux d'études, l'EFH est surtout étudiée sous l'angle de la dimension physique voire organisationnelle. Plus particulièrement, la synergie entre les trois dimensions cognitives, physiques et organisationnelles doit être renforcée dans les études autour l'activité de maintenance.
- **Adapter rapidement les processus d'intégration de l'EFH**, quel que soit le contexte socio-économique, à l'instar de la crise sanitaire de la COVID qui a impacté l'organisation de préparation des analyses EFH.

- **Poursuivre la systématisation de la simulation** au sein du bureau d'études pour anticiper les activités de maintenance, comme c'est déjà le cas pour la simulation de l'activité des pilotes.
- **Capitaliser sur la pénibilité de l'activité réelle en maintenance aéronautique**. La variabilité du travail dans ce secteur est complexe, changeant en fonction de l'organisation et de la réglementation au travail local (dépendant du pays), de la culture, des formations, des conditions environnementales etc.
- **Favoriser le travail collaboratif entre ergonomes** au sein de la maintenance, comme par exemple entre l'ergonome référent de la maintenabilité et l'ergonome référent dans le département rédigeant les procédures de maintenance. La convergence des points des vues et des études EFH doit amener à renforcer le compromis entre les critères bureau d'études (mécaniques, aérodynamiques, avioniques...) et les exigences EFH.
- **Garder le contrôle et la maîtrise de l'EFH** au sein d'environnements composés majoritairement d'ingénieurs non spécialisés en EFH.
- **Maîtriser l'hétérogénéité du niveau de connaissances des outils de simulation**, notamment autour de leur efficacité et de leur limite pour réaliser des analyses EFH.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

-A-

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. https://doi.org/10.3923/jas.2007.3234.3241

AFIM. (2004) Association française des ingénieurs et responsables de maintenance- santé et sécurité au travail : les métiers de la maintenance en première ligne. Guide national de la maintenance.

AFNOR, 1988. NF L 00-007 : Norme française - industrie aéronautique et spatiale - vocabulaire- termes généraux (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, 2011. NF X35-109 : Ergonomie - Manutention manuelle de charge pour soulever, déplacer et pousser/tirer - Méthodologie d'analyse et valeurs seuils (Norme).

AFNOR, 2017. NF EN 15341 : Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance (Norme).

Alavi, S. S., Makarem, J., Abbasi, M., Rahimi, A., & Mehrdad, R. (2016). Association between upper extremity musculoskeletal disorders and mental health status in office workers [Publisher: IOS Press]. Work, 55(1), 3–11. https://doi.org/10.3233/WOR-162382

Ahmad Al Khatib (2015). Conception collaborative du couple produit/usage : approche à travers des objets intermédiaires de conception. Thèse de Doctorat. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard. Français. ⟨NNT : 2015BELF0273⟩. ⟨tel-01875366⟩

Alvarez-Lopez, F., Maina, M. F., & Saigí-Rubió, F. (2020). Use of a low-cost portable 3d virtual reality gesture-mediated simulator for training and learning basic psychomotor skills in minimally invasive surgery: development and content validity study. Journal of medical Internet research, 22(7), e17491. http://doi.org/10.2196/17491

Amalberti, R. (2013). Piloter la sécurité : théories et pratiques sur les compromis et les arbitrages nécessaires. Springer.

Amalberti, R., & Wioland, L. I. E. N. (2020). Human error in aviation. In Aviation Safety, Human Factors-System Engineering-Flight Operations-Economics-Strategies-Management (pp. 91-108). CRC Press.

Amiard, V., and J-P. Libert. "Apports et limites de la fréquence cardiaque dans l'analyse de la pénibilité au travail en relation avec la charge physique." Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 77.4 (2016): 683-691. https://doi.org/10.1016/j.admp.2015.09.001

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.

Anastassova, M. (2006). L'analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergente : le cas de la Réalité Augmentée pour la formation à la maintenance automobile (Doctoral dissertation, Université René Descartes-Paris V).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) (2016). Rapport « Révisions des repères relatifs à l'activité physique et à la sédentarité ». Rapport N°2012-SA-0155.

Atain-Kouadio, J. J., Claudon, L., Mazière, P., Meyer, J. P., Navier, F., Turpin-Legendre, E., & Zana, J. P. (2014). Méthode d'analyse de la charge physique de travail. Editions INRS ED, 6161.

Aylwin, U. (1988). L'analyse et la synthèse dans les processus de la mémoire. Prospectives, vol. 24, no 4, déc. 1988, p. 171-174.

Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6, 355-385. https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355

Azuma, R. T., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. IEEE Computer Graphics and Applications, 21, 34-47. https://doi.org/10.1109/38.963459

-B-

Barcellini, F., Van Belleghem, L. & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. In P. Falzon (Eds), Ergonomie constructive (pp 191-206). Presses Universitaires de France. https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2013.01.0191

Barcellini, F. (2015). Comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail. [Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bordeaux].

Bataille, C., & Galley, R. (1998). Rapport sur l'aval du cycle nucléaire. Assemblée Nationale, Sénat, Office Parlementaire d'évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques.

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. http://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.011

Begur, Suhas H., and J. Ashok Babu (2016). Human Factors in Aircraft Maintenance. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology. Vol. 3, issue 3. https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.3303

Belhadi, A., Kamble, S., Jabbour, C. J. C., Gunasekaran, A., Ndubisi, N. O., & Venkatesh, M. (2021). Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. Technological Forecasting and Social Change, 163. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120447

Belleghem, L. V. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique: acquis et perspectives. Activités, 15(15-1). https://doi.org /10.4000/activites.3129

Bernard, F. (2019). Intégration du facteur humain en maintenabilité aéronautique : apports des outils de simulation. [Thèse de doctorat, Université Bourgogne Franche-Comté].

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C., Paquin, R (2019). 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

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J.-C., & Paquin, R. (2020). Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability. Human Factors, 62(1), 37–54. https://doi.org/10.1177/0018720819861496

Bernard, F., Zare, M. Murie, C. & Sagot, J.-C. (2021). Dimensions physiques et cognitives : vers une nécessaire prise en compte en maintenabilité aéronautique. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement. https://doi.org/10.1016/j.admp.2020.10.004

Bertin, M., Bluntzer, J. B., Roger, M., Sagot, J. C., Denis, D., & del Fabbro, L. (2018). Design for Well-being into the Automotive Design Process: Contribution to the Evaluation Space. International Journal of Design and Innovation Research, 7(1), 72-87.

Bernhard, B. P. (1997). A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity and low back [Publisher: US Department of Health and Human Services. NIOSH]. Musculoskeletal disorders and workplace factors.

Bevan, S. (2015). Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe [Publisher: Elsevier]. Best Practice & Research Clinical Rheumatology, 29(3), 356‑373.

Bobillier Chaumon, M. E., Rouat, S., Laneyrie, E., & Cuvillier, B. (2018). De l'activité DE simulation à l'activité EN simulation: simuler pour stimuler. Activités, 15(15-1). https://doi.org/10.4000/activites.3136

Boothroyd, G., & Alting, L. (1992). Design for assembly and disassembly. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 41(2), 625-636. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63249-1

Borel, P., Mageau, E., Mignot, G (2007). Astreinte cardiaque chez les techniciens de maintenance d'antennes relais de radiotéléphonie mobile. CAMIP, 47(1), 13-18.

Boudet, G., Roussel, C., Chamoux, A., & Dutheil, F. (2018a). L'astreinte cardiaque pour valider des choix organisationnels. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 79(3), 284-285. https://doi.org/10.1016/j.admp.2018.03.155

Boudet, G., Chamoux, A., & Dutheil, F. (2018b). L'astreinte cardiaque est individuelle et doit être évaluée. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement, 79(3), 334. https://doi.org/10.1016/j.admp.2018.03.273

Bouzou, N., & de Funès, J. (2018). La comédie (in) humaine. Comment les entreprises font fuir les meilleurs. Éditions de l'Observatoire.

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. http://doi.org/10.1017/dsj.2017.8

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. https://doi.org/10.1002/hfm.20081

Buisine, S., Boisadan, A., & Richir, S. (2018). L'innovation radicale par la méthode de l'utilisateur extraordinaire. Psychologie du Travail et des Organisations, 24(4), 374-386. https://doi.org/10.1016/j.pto.2017.11.001

-C-

Carlile, P. R. (2004). Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries. Organization science, 15(5), 555-568. http://doi.org/10.1287/orse.1040.0094

Carruth, D. W. (2017). Virtual reality for education and workforce training. In 2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA) (pp. 1-6). IEEE. http://doi.org/10.1109/ICETA.2017.8102472

Chagué, S., & Charbonnier, C. (2016, March). Real virtuality: a multi-user immersive platform connecting real and virtual worlds. In Proceedings of the 2016 virtual reality international conference (pp. 1-3). https://doi.org/10.1145/2927929.2927945

Chan, A., & Man, S. (2022). human factors and ergonomics: bridging the gap between research and practice in occupational safety and health. International Journal of Environmental Research and Public Health, Special Issue.

Chang, Y. H., & Wang, Y. C. (2010). Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians. Safety science, 48(1), 54-62. http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.05.004.

Chapanis, A., Garner, W. R., Morgan, C. T., & Sanford, F. H. (1947). Lectures on men and machines. An introduction to human engineering. JOHNS HOPKINS UNIV BALTIMORE MD.

Chaparro, A., Rogers, B., Hamblin, C., & Chaparro, B. (2004). A comparison of three evaluative techniques for validating maintenance documentation. (Final Report). Washington D. C. : Federal Aviation Administration

Chapouille, P. (1987). Maintenabilité. Maintenance. Ed. Techniques Ingénieur.

Chatterjee, B., & Bhowmik, S. (2019). Evolution of material selection in commercial aviation industry—a review. Sustainable engineering products and manufacturing technologies, 199-219. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816564-5.00009-8

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 03971958 [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy].

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. http://doi.org/10.3357/AMHP.4817.2017

Christmann, O., Fleury, S., Gorisse, Migaud, J., Raimbault, V., & Richir, S. (2022). User centred design of a system for the visualization of flows and concentrations of particles in the air. Information Visualizations. 21(3). https://doi.org/10.1177/14738716221085

Caudell, T.P., Mizell, D.W. (1992). Augmented reality: An application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In Hawaii international conference on system sciences (Vol. 2). ACM SIGCHI Bulletin.

Cohen, T. N., Francis, S. E., Wiegmann, D. A., Shappell, S. A., & Gewertz, B. L. (2018). Using HFACS-healthcare to identify systemic vulnerabilities during surgery. American Journal of Medical Quality, 33(6), 614-622. https://doi.org/10.1177/1062860618764316

Cox, L.A. Jr. (2008). What's Wrong with Risk Matrices?. Risk Analysis, Vol. 28, No. 2. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x

Cuvelier, L., & Woods, D. D. (2019). Sécurité réglée et/ou sécurité gérée : Quand l'ingénierie de la résilience réinterroge l'ergonomie de l'activité. Le Travail Humain, 82, 41–66. 41-66. https://doi.org/10.3917/th.821.0041.

-D-

Dalkou, S. et Clair, C. (2017). Tabagisme, vapotage et risque cardiovasculaire : mise au point. Rev Med Suisse, 13, 1186-90. https://doi.org/10.53738/REVMED.2017.13.566.1186

Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: a systematic ergonomics approach. Applied Ergonomics, 27(3), 157-163. https://doi.org/10.1016/0003-6870(96)00008-7

Decoo, W. (1996). The induction‐deduction opposition: ambiguities and complexities of the didactic reality, Int. Rev. Appl. Linguist. Lang. Teach. 34, no. 2, 95‐118. https://doi.org/10.1515/iral.1996.34.2.95

De Crescenzio, F., Fantini, M., Persiani, F., Di Stefano, L., Azzari, P. and Salti, S. (2010). Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support. IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 31, No. 1, pp.96–101. https://doi.org/10.1109/MCG.2011.4

De Terssac, G., & Gaillard, I. (2009). La sécurité en action. Octarès.

Dhillon, B. S., & Liu, Y. (2006). Human error in maintenance: a review. Journal of quality in maintenance engineering, 12(1), 21-36. https://doi.org/10.1108/13552510610654510

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.

Diller, T., Helmrich, G., Dunning, S., Cox, S., Buchanan, A., & Shappell, S. (2014). The human factors analysis classification system (HFACS) applied to health care. American journal of medical Quality, 29(3), 181-190. https://doi.org/ 10.1177/1062860613491623

Ding, Y. (2009). Product maintainability design method and support tool based on feature model. Journal Software Engineering & Applications, 2, pp 165-172. http://doi.org/ 10.4236/jsea.2009.23024

Dubey, G. (1997). Faire «comme si» n'est pas faire, La Simulation en Ergonomie: connaître, agir et interagir, pp. 39‐53.

Duchamp, R. (1999). Méthode de conception des produits nouveaux. Paris: Hermès-Lavoisier.

Dul, J., Bruder, R., Buckle, P., Carayon, P., Falzon, P., Marras, W. S., Wilson, J.R. & van der Doelen, B. (2012). A strategy for human factors/ergonomics: developing the discipline and profession. Ergonomics, 55(4), 377-395. https://doi.org/ 10.1080/00140139.2012.661087

Dugué, B., Petit, J., & Daniellou, F. (2010). L'intervention ergonomique comme acte pédagogique. Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, (12-3). https://doi.org/10.4000/pistes.2767

Dunning, D. (2011). The Dunning–Kruger effect: On being ignorant of one's own ignorance. In Advances in experimental social psychology (Vol. 44, pp. 247-296). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385522-0.00005-6

Dyck, F., Stöcklein, J., Eckertz, D., & Dumitrescu, R. (2020). Mixed mock-up–development of an interactive augmented reality system for assembly planning. In Virtual, Augmented and Mixed Reality. Design and Interaction: 12th International Conference, VAMR 2020, Held as Part of the 22nd HCI International Conference, HCII 2020, Copenhagen, Denmark, July 19–24, 2020, Proceedings, Part I 22 (pp. 37-49). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49695-1_3

-E-

EASHW. (2008). Work-related musculoskeletal disorders: prevention report. European Agency for Safety, Health, and Work. Luxembourg. https://osha.europa.eu/en/publications/reportwork-related-musculoskeletal-disorders-prevention-report

EASHW. (2019). Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. European Agency for Safety and Health at Work. Luxembourg. Retrieved April 12, 2022, from https://osha.europa.eu/fr/publications/msds-facts-and-figures-overviewprevalence-costs-and-demographics-msds-europe

EASHW. (2022, January 12). Strategies to tackle musculoskeletal disorders at work. Retrieved October 8, 2022, from https://oshwiki.eu/wiki/Strategies_to_tackle_musculoskeletal_disorders_at_work

El Braidy, P., El-Khawand, C., Korkomaz, C., Makdissy, R., Akawi, R., & Lattouf, N. A. (2022). Prévalence et facteurs de risques des troubles musculo-squelettiques liés au travail chez les physiothérapeutes au Liban. Kinésithérapie, la Revue, 22(246), 12-21. https://doi.org/10.1016/j.kine.2021.10.006

Embrey, D. (2015). SHERPA: A Systematic Human Error Reduction and Prediction Approach to modelling and assessing human reliability in complex tasks. Nutritional Care of the Patient with Gastrointestinal Disease, 311.

Eurofound. (2012). Fifth european working conditions survey. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

Eurofound. (2017). Sixth european working conditions survey - overview report. Publications Office of the European Union. Luxembourg.

European Agency for safety and Health at work. Safe maintenance in practice (2010). Luxembourg: Publications Offices of theEuropean Union ; p. 102.

-F-

Fajardo Rodriguez, H. A., & Ortiz Mayorga, V. A. (2016). Characterization of low back pain in pilots and maintenance technicians on a commercial airline. Aerospace medicine and human performance, 87(9), 795-799. http://doi.org/10.3357/AMHP.4384.2016

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). https://doi.org/10.1145/2909132.2909268

Fitts, P. M. (Ed.). (1947). Psychological research on equipment design (Research Report 19). Washington, DC: U.S. Army Air Forces Aviation Psychology Program.

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.

Fleury, S., & Richir, S. (2021). Immersive Technologies to Accelerate Innovation. How Virtual and Augmented Reality Enables the Co-Creation of Concepts. ISTE, Wiley, Vol 38.

Fleury, S., Richir S. (2023). The end of the digital generation gap. Journal of Ergonomics Studies and Research, 2(1). http://hdl.handle.net/10985/23101

Fourcade, F. (2005). Modularisation du produit automobile et stratégies des équipementiers. Revue Française de Comptabilité, 40-47.

Frimat, P., Chamoux, A., De Gaudemaris, R., Cantineau, A., & Amphoux, M. (1989). Fréquence cardiaque et travail. Quelle utilisation, 357-360.

-G-

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. https://doi.org/10.1080/10494820.2013.815221

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). https://doi.org/10.4000/pistes.3725

Glade, M. (2005). Modélisation des coûts de cycle de vie: prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité: Application à l'aéronautique (Doctoral dissertation, Ecully, Ecole centrale de Lyon).

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. https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.007

Gill, S., "Addressing Maintenance Human Factors During Aircraft Design PhD Thesis," Nottingham University, 2009.

Gill, S. (2019, November). Use of human hazard analysis to enhance resilient performance of helicopter maintenance systems. In REA Symposium on Resilience Engineering Embracing Resilience.

Giovanelli, Y., & Touchard, V. (2018). Prise en compte du management des risques dans la conception et l'intégration de nouvelles technologies d'assistance physique. 21e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement.

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., & Nivelet, T. (2021). Allier les approches réglementaire et ergonomique de l'externalisation de la maintenance dans un objectif de prévention. Le travail humain, (3), 257-287. https://doi.org/ 10.3917/th.843.0257.

Guerlesquin, G., 2012. Articulation Ergonomie - Design - Conception Mécanique : Approche Méthodologique de la Convergence Multidisciplinaire [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard].

-H-

Ha, C., & Roquelaure, Y. (2010). Troubles musculo-squelettiques d'origine professionnelle en France. Où en est-on aujourd'hui?. Bulletin Epidémiologique Hebdomadaire-BEH, (5-6), 35-37.

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.

Hawkins, F.H., & Orlady, H.W. (Ed.). (1993). Human factors in flight (2nd ed.). England: Avebury Technical, 1993. https://doi.org/10.1556/aphysiol.88.2001.3-4.4

Haryono, A., Sofianti, T. D., & Hendriana, D. (2022). APPLICATION OF HFACS-HFIX FRAMEWORK IN NTSC'S FINDINGS AND RECOMMENDATIONS: WAMENA AIR ACCIDENTS'CASE STUDY. International Journal of Industrial Management, 13(1), 471-478. https://doi.org/10.15282/ijim.13.1.2022.6092

Hejjel, L., & Gál, I. (2001). Heart rate variability analysis. Acta Physiologica Hungarica, 88(3-4), 219-230. https://doi.org/10.2174/1573403X16999201231203854

Helioffshore (2021). Standardised Approach for Airframe Designers. Published online by Helioffshore. https://www.helioffshore.org/resources/human-hazard-analysis

Herrmann, A. S., Zahlen, P. C., & Zuardy, I. (2005). Sandwich structures technology in commercial aviation: present applications and future trends. In Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29–31 August 2005 (pp. 13-26). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/1-4020-3848-8_2

Hobbs, A., & Williamson, A. (2003). Associations between errors and contributing factors in aircraft maintenance. Human factors, 45(2), 186-201. https://doi.org/10.1518/hfes.45.2.186.27244

Hollnagel, E., Wears, R., & Braithwaite, J. (2015). From Safety-I to Safety-II: A White Paper. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4051.5282

Horeman, T., Akhtar, K., & Tuijthof, G. J. (2015). Physical Simulators. In Effective Training of Arthroscopic Skills (pp. 57-69). Springer Berlin Heidelberg.

Houzangbe, S., Antonio Gomez Jauregui, D., Fleury, S., Huet, L., Berdon, L., Manusset, B., Subert, P., Pigrée, J-B., Couture, N., & Richir, S. (2021). Studying the influence of Stress on Creativity in a Virtual reality Scenario. 2nd Momentary Emotion Elicitation & Capture (MEEC). http://hdl.handle.net/10985/20363

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. https://doi.org/10.1007/s12008-015-0282-3

HSE. (2021). Work-related musculoskeletal disorders statistics in great britain. Health and Safety Executive, United Kingdom. London.

Hurtrel, F., Beretz, L., Renard, V., & Hutt, A. (2012). Analyse des risques liés au circuit de gestion et de dispensation des produits en expérimentation clinique par «AMDEC». Risques & qualité, 1, 22-30.

-I-

Illankoon, P., Tretten, P., & Kumar, U. (2019). A prospective study of maintenance deviations using HFACS-ME. International Journal of Industrial Ergonomics, 74, 102852. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.102852

INRS (2017). Accidents du travail et maladies professionnelles (AT-MP). Retrieved January 09, 2017 from https://www.inrs.fr/demarche/atmp/ce-qu-il-faut-retenir.htm

INRS (2017). Risques liés aux chutes de hauteur. Retrieved April 18, 2017, from https://www.inrs.fr/risques/chutes-hauteur/reglementation-travail-hauteur.html

INRS (2020). Troubles musculosquelettiques (TMS). Ce qu'il faut retenir - Risques - INRS. Retrieved January 18, 2022, from https://www.inrs.fr/risques/tms-troubles-musculosquelettiques/ce-qu-il-faut-retenir.html

Iribarne, Philippe (1996). Vous serez tous des maîtres, Paris, Seuil.

Israel, J. H. (2006). Tangible Interfaces in Virtual Environments. INFORMATIK 2006–Informatik für Menschen–Band 2, Beiträge der 36. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik eV (GI).

-J-

Jeantet, A. (1998). Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception. Sociologie du travail, 98(3), 291-316.

Jin, Y. S., Kim, Y. W., & Park, J. (2007, November). ARMO: Augmented reality based reconfigurable mock-up. In 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (pp. 273-274). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISMAR.2007.4538863

-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. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.009

Kaptan, M., Sarıalioğlu, S., Uğurlu, Ö., & Wang, J. (2021). The evolution of the HFACS method used in analysis of marine accidents: A review. International Journal of Industrial Ergonomics, 86, 103225. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103225

Karwowski, W. (2012). The discipline of human factors and ergonomics. Handbook of human factors and ergonomics, 4, 3-37.

Kelly, D., & Efthymiou, M. (2019). An analysis of human factors in fifty controlled flight into terrain aviation accidents from 2007 to 2017. Journal of safety research, 69, 155-165. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2019.03.009

Keyserling, Brouwer, & Silverstein. (1992). A checklist for evaluating ergonomic risk factors resulting from awkward postures of the legs, trunk and neck. International Journal of Industrial Ergonomics, 9(4), 283–301. https://doi.org/10.1016/0169-8141(92)90062-5

Kinnison, Harry A. & Siddiqui T. (2013). Aviation Safety Management, McGraw-Hill Education

Kline S. et Rosenberg N. (1986). "An overview of innovation" in Landau R. et Rosenberg N. The positive Sum, Washington, national Academy Press.

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), 1-8. https://doi.org/10.1186/1471-2474-11-272

Kolus, A., Wells, R., & Neumann, P. (2018). Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework. Applied ergonomics, 73, 55-89. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.05.010

Koonce, J. M. (1984). A brief history of aviation psychology. Human Factors, 26(5), 499-508. https://doi.org/10.1177/001872088402600502

Korhan, O., & Memon, A. A. (2019). Introductory chapter: work-related musculoskeletal disorders. Work-related musculoskeletal disorders. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.85479

Kowalski, K.B., & Swanson, J.A. (2005). Critical success factors in developing teleworking programs. Benchmarking: An International Journal, 12, 236-249. https://doi.org/10.1108/14635770510600357

Kinnison, H. A. (2013). Aviation maintenance management. McGraw-Hill Education.

Knöpfle, C. and Voβ, G. (2000). An intuitive VR user interface for design review. In Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, pp.98–101. https://doi.org/10.1145/345513.345265

Kruger, J., & Dunning, D. (1999). Unskilled and unaware of it: how difficulties in recognizing one's own incompetence lead to inflated self-assessments. Journal of personality and social psychology, 77(6), 1121. https://doi.org/10.1037//0022-3514.77.6.1121.

Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. CIRP Annals-Manufacturing Technology. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.046

Kumar, P. S.; Kumar, K. S. and Prasad, N. N. (2018). An approach to develop Virtual Reality Flight Simulator for combat aircraft cockpit evaluation.

-L-

Latorella, K. A., & Prabhu, P. V. (2017). A review of human error in aviation maintenance and inspection. Human Error in Aviation, 521-549., http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00063-3.

Legifrance (2009). Code du travail – Partie réglementaire (Articles R1111(1 à R8323-1) – Quatrième partie : Santé et sécurité au travail. En vigueur le 16 mars 2009. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006072050/LEGISCTA000018488235/#LEGISCTA000018532924

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. https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.06.022

Lehto, M. R., & Landry, S. J. (2012). Introduction to human factors and ergonomics for engineers. Crc Press.

Leiber, D., Tanz, L. and Reinhart, G. (2021). Augmented reality in der Montagetechnik/augmented reality in assembly technology. wt Werkstattstechnik online, Vol. 111, No. 3, pp.130–135.

Lémonie, Y. (2019). Des marges de manœuvre à la diversité et à la variabilité motrice dans la prévention des TMS. Le travail humain, vol. 82(1), 67-97. https://doi.org/10.3917/th.821.0067

Lenné, M. G., Salmon, P. M., Liu, C. C., & Trotter, M. (2012). A systems approach to accident causation in mining: an application of the HFACS method. Accident analysis & prevention, 48, 111-117. https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.05.026

Lombès, T., & Poubeau, B. (2014). Obsolescence programmée (Doctoral dissertation, Ecole nationale Supérieure des mines de Paris).

London, B. (2014). Ending the depression through planned obsolescence. Revue du MAUSS, 44(2), 47-50.

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.

Loup-Escande E. & G. Loup (2021) Designing acceptable emerging technologies: what contribution from ergonomics? Theoretical Issues in Ergonomics Science, 22(5), 581-602, https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1836568

Lu, C. T., Schreckengast, S., Ropp, T. D., & Dillman, B. (2011). System safety study: Pedagogical aviation action research. Journal of Aviation/Aerospace Education & Research, 20(3), 5. https://doi.org/10.15394/jaaer.2011.1641

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. https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1180856

-M-

Mahdjoub, M., 2007. La Réalité Virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur. [Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard].

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.

Malchaire, J. (1988). Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. Cah Med Trav, 25(4), 181-6.

Mann, S., & Holdsworth, L. (2003). The psychological impact of teleworking: stress, emotions and health. New Technology, Work and Employment, 18(3), 196-211. https://doi.org/10.1111/1468-005X.00121

Martin C., Baradat D. (2003). Des pratiques en réflexion - Dix ans de débats sur l'intervention ergonomique. Éditions Octarès, Toulouse.

Marras, Lavender, Leurgans, Fathallah, Ferguson, Allread, & Rajulu. (1995). Biomechanical risk factors for occupationally related low back disorders. Ergonomics, 38(2), 377–410. https://doi.org/10.1080/00140139508925111

Mazeau, M. (1993). L'homme, agent de fiabilité faillible. Performances Humaines & Techniques, 66, 24-29.

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. https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S

McDonald, N., Corrigan, S., Daly, C., & Cromie, S. (2000). Safety management systems and safety culture in aircraft maintenance organisations. Safety Science, 34(1-3), 151-176. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00011-4

Mehta, R. K., & Agnew, M. J. (2012). Influence of mental workload on muscle endurance, fatigue, and recovery during intermittent static work. European journal of applied physiology, 112, 2891-2902. https://doi.org/ 10.1007/s00421-011-2264-x

Meidani, A. (2021). Santé au travail, maintien en emploi et genre dans les très petites entreprises. Travail et emploi, (164-165), 85-110.

Meister, D. (2018). The history of human factors and ergonomics. CRC Press.

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. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64352-6_64

Meunier, P. (1997). Protocole pratique de mesurage et d'analyse cardiofréquencemétrique. Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP), n° 3, p. 287-293.

Meyer, J. (1996). La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. INRS Documents pour le médecin du travail TL, 20(8).

Misra, K. B. (2008). Maintenance engineering and maintainability: An introduction. Handbook of performability engineering, 755-772.

Mostosi, C., Stéphenne, J. F., Kempeneers, E., Denis, D., Plamondon, A., & Dierick, F. (2022). Handling strategies of novice and experienced baggage handlers when using an extendable roller track conveyor in the cargo hold of a narrow-body aircraft. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1691418/v1

Morel, G., Amalberti, R., & Chauvin, C. (2008). Articulating the differences between safety and resilience: The decision-making process of professional sea-fishing skippers. Human Factors, 50(1), 1–16. https://doi.org/10.1518/001872008X250683

Moreu De Leon, P., & Crespo, M. Ã. (2012). A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes. Reliability Engineering and System Safety, 100(C), 84-92. https://doi.org/ 10.1016/j.ress.2011.12.018

Murie, C. (2022). Articuler Sécurité Réglée et Sécurité Gérée dans les compromis en conception : une approche croisée du travail et de mécaniciens pour une maintenance aéronautique sûre. Psychologie. HESAM Université, 2022. Français. NNT : 2022HESAC022. tel-03971958 [Thèse de doctorat, Conservatoire national des Arts et Métiers].

-N-

Nathanael, D., Tsagkas, V., & Marmaras, N. (2016). Trade-offs among factors shaping operators decision-making: the case of aircraft maintenance technicians. Cognition, Technology and Work, 18(4), 807–820. https://doi.org/10.1007/s10111-016-0393-z

NIOSH. (1997). Musculoskeletal disorders and workplace factors. (National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services).

Nottingham, C. R., Ortega, R. A., Rangarajan, B., Koch, P. N., & Mistree, F. (1997, September). Designing for maintainability in preliminary aircraft engine design. In International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 80449, p. V002T29A021). American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/DETC97/DAC-3963

-O-

Oberhauser, M., & Dreyer, D. (2017). A virtual reality flight simulator for human factors engineering. Cognition, Technology & Work, 19, 263-277. https://doi.org/10.1007/s10111-017-0421-7

Obermair, F., Althaler, J., Seiler, U., Zeilinger, P., Lechner, A., Pfaffeneder, L., Richter, M. and Wolfartsberger, J. (2020). Maintenance with augmented reality remote support in comparison to paper-based instructions: experiment and analysis, in 2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), IEEE, pp.942–947. 10.1109/ICIEA49774.2020.9102078

O'Connor, S. L., & Hardiman, T. (2017). Human error in civil aircraft maintenance and dispatch: The basis of an error taxonomy. In Engineering psychology and cognitive ergonomics (pp. 315-321). Routledge.

Okutsu, M., DeLaurentis, D., Brophy, S., & Lambert, J. (2013). Teaching an aerospace engineering design course via virtual worlds: A comparative assessment of learning outcomes. Computers & Education, 60(1), 288-298. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.07.012

-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. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2017.06.002

Papadopoulos, T., Evangelidis, K., Kaskalis, T.H., Evangelidis, G. and Sylaiou, S. (2021). Interactions in augmented and mixed reality: an overview. Applied Sciences, Vol. 11, No. 18, p.8752. https://doi.org/ 10.3390/app11188752.

Parent, M. (2019). Diagnosticité des mesures physiologiques périphériques de la charge mentale [Doctoral dissertation, Université Laval].

Perrin, J. (2021). Concevoir l'innovation industrielle: Méthodologie de conception de l'innovation. CNRS Éditions via OpenEdition.

Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., & Papageorgiou, L. G. (2000). Process design for maintainability: an optimization approach. Computers & Chemical Engineering, 24(2), 203-208. https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00514-7

Pithon, T., Weiss, T., Richir, S., & Klinger, E. (2009). Wheelchair simulators: A review. Technology and Disability, 21(1-2), 1-10. https://doi.org/ 10.3233/TAD-2009-0268

Proctor, R. W. (2018). Human factors in simple and complex systems. CRC press.

Punnett, Fine, Keyserling, Herrin, & Chaffin. (1991). Back disorders and non neutral trunk postures of automobile assembly workers. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 17(5), 337–346. https://doi.org/10.5271/sjweh.1700

-R-

Radwin, Marras, & Lavender. (2001). Biomechanical aspects of work-related musculoskeletal disorders [Publisher: Taylor & Francis _eprint: https://doi.org/10.1080/14639220110102044]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2(2), 153–217. https://doi.org/10.1080/14639220110102044

Rae, A., Provan, D., Aboelssaad, H., & Alexander, R. (2020). A manifesto for Reality-based Safety Science. Safety science, 126, 104654. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104654

Rakkolainen, I., Farooq, A., Kangas, J., Hakulinen, J., Rantala, J., Turunen, M. and Raisamo, R. (2021). Technologies for multimodal interaction in extended reality—a scoping review. Multimodal Technologies and Interaction, Vol. 5, No. 12, p.81. https://doi.org/10.3390/mti5120081

Rankin, W. L., & Allen, J. (1995). Use of the maintenance error decision aid (MEDA) to enhance safety and reliability and reduce costs in the commercial aviation industry. In Proceedings of the International Air Transport Association's 1995 Aircraft Maintenance Seminar and Exhibition. The Changing Vision. November (pp. 14-16).

Rauschnabel, Philipp, A., Babin, B.J., Dieck, M.C.T., Krey, N. and Jung, T. (2022). What is augmented reality marketing? Its definition, complexity, and future. Journal of Business Research, Vol. 142, pp.1140–1150. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.12.084

Reason, J. (1990). Human error. Cambridge university press.

Reason, J., & Hobbs, A. (2017). Managing maintenance error: a practical guide. ASHGate.

Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital Human Models and Virtual Ergonomics to Improve Maintainability. Computer-Aided Design and Applications, 11(1), 10-19. https://doi.org/10.1080/16864360.2013.834130

Reuzeau, F. (1999). The pilot's participation in cockpit design- What can the manufacturer expect from them? In International Symposium on Aviation Psychology, 10 th, Columbus, OH (pp. 99-104).

Reuzeau, F. (2000). Assister l'évaluation participative des systèmes complexes : rôle des savoirs et savoir-faire des utilisateurs dans la conception d'un poste de pilotage d'avion [Thèse de Doctorat, Paris, CNAM].

Richir, S., Fuchs, P., Lourdeaux, D., Millet, D., Buche, C., & Querrec, R. (2015). How to design compelling Virtual Reality or Augmented Reality experience? International Journal of Virtual Reality, 15, 35-47. https://doi.org/10.20870/IJVR.2015.15.1.2867

Robert, L., Turpin-Legendre, E., Shettle, J., Tissot, C., Aubry, C., & Siano, B (2019). Travailler dans une ambiance thermique chaude. Références en santé au travail. INRS, N°158, 31-58

Röltgen, D., & Dumitrescu, R. (2020). Classification of industrial Augmented Reality use cases. Procedia CIRP, 91, 93-100. https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.137

Rostamabadi, A., Jahangiri, M., Zarei, E., Kamalinia, M., Banaee, S., & Samaei, M. R. (2019). A novel fuzzy bayesian network-HFACS (FBN-HFACS) model for analyzing human and organization factors (HOFs) in process accidents. Process Safety and Environmental Protection, 132, 59-72. https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.08.012

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. https://doi.org/ 10.1109/IHMSC.2009.152

-S-

Safi, M., Chung, J., & Pradhan, P. (2019). Review of augmented reality in aerospace industry. Aircraft engineering and aerospace technology, 91(9), 1187-1194. https://doi.org/10.1108/AEAT-09-2018-0241

Sagnier, C., Loup-Escande, É. & Valléry, G. (2019). Acceptabilité de la réalité virtuelle : une revue de la littérature. Le travail humain, 82, 183-212. https://doi.org/10.3917/th.823.0183

Sagot, J. C. (1999). Ergonomie et conception anthropocentrée. Document pour l'Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, 21.

Sagot, J. C., Gouin, V., & Gomes, S. (2003). Ergonomics in product design: safety factor. Safety science, 41(2-3), 137-154. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(02)00038-3

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. https://doi.org/ 10.1109/IRDS.2002.1041709

Saleh, J. H., Tikayat Ray, A., Zhang, K. S., & Churchwell, J. S. (2019). Maintenance and inspection as risk factors in helicopter accidents: Analysis and recommendations. PloS one, 14(2), e0211424. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211424

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. https://doi.org/10.1108/eb002871

Seth, A., Vance, J.M., Oliver, J.H. (2011). Virtual reality for assembly methods prototyping: a review. Virtual reality. 15-1, pp 5-20. https://doi.org/10.1007/s10055-009-0153-y

Shanmugam, A., & Robert, T. P. (2015). Human factors engineering in aircraft maintenance: A review. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 21(4), 478–505. https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0030

Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2000). The human factors analysis and classification system--HFACS. Retrieved from https://commons.erau.edu/publication/737

Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2001). Applying Reason: The human factors analysis and classification system (HFACS). Human Factors and Aerospace Safety.

Shi, Y., & Liu, Y. (2012, August). Application of DELMIA on maintainability design of aircraft. In 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling (pp. 771-774). Atlantis Press. https://doi.org/ 10.2991/ICCASM.2012.195

Smith, T. M. (1976). Project Whirlwind: An Unorthodox Development Project. Technology and Culture, 447-464. https://doi.org/10.2307/3103524

Soiferman, L. K. (2010). Compare and Contrast Inductive and Deductive Research Approaches. Online Submission.

Spieske, A., & Birkel, H. (2021). Improving supply chain resilience through industry 4.0: A systematic literature review under the impressions of the COVID-19 pandemic. Computers & Industrial Engineering, 158. https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107452

Strauch, B. (2017). Investigating human error: Incidents, accidents, and complex systems. CRC Press.

-T-

Tcha-Tokey, K., Christmann, O., Loup-Escande, E., & Richir, S. (2016). Proposition and validation of a questionnaire to measure the user experience in immersive virtual environments. International Journal of Virtual Reality, 16(1), 33-48. https://doi.org/10.20870/IJVR.2016.16.1.2880

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. Dans Simulation en ergonomie : connaître agir interagir. Octares

Thorvald, P., Lindblom, J., & Andreasson, R. (2019). On the development of a method for cognitive load assessment in manufacturing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 59, 252-266. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.04.012

Thibault, J. F., Merlin, X., & Garrigou, A. (2013). 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). https://doi.org/10.4000/pistes.3430

Torny, D. (2012). De la gestion des risques à la production de la sécurité: L'exemple de la préparation à la pandémie grippale. Réseaux, 171(1), 45-66. https://doi.org 10.3917/res.171.0045.

Torten, R., Reaiche, C., & Caraballo, E. L. (2016). Teleworking in the new milleneum. The Journal of Developing Areas, 50(5), 317-326. https://doi.org 10.1353/jda.2016.0060

Tremblay, D. G. (2020) Le télétravail: Quels enjeux et avantages, notamment en cette période de pandémie? Note d'actualité sur le télétravail. Université du Québec.

-V-

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. https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006

Van Wyk, E., & De Villiers, R. (2009, February). Virtual reality training applications for the mining industry. In Proceedings of the 6th international conference on computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa (pp. 53-63). https://doi.org/10.1145/1503454.1503465

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

Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière: Vers la prise en compte du travail d'équipement. Revue d'anthropologie des connaissances, 3,1, 51-72. https://doi.org/10.3917/rac.006.0051

Virovac, D., Domitrović, A., & Bazijanac, E. (2017). The influence of human factor in aircraft maintenance. Promet-Traffic&Transportation, 29(3),257-266. http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v29i3.2068.

Vogel, S., Herron, C., Cole, S. P., & York, H. (2011). Effectiveness of a guided inductive versus a deductive approach on the learning of grammar in the intermediate-level college French classroom. Foreign language annals, 44(2), 353-380. https://doi.org/10.1111/j.1944-9720.2011.01133.x

-W-

Wang, J., Fan, Y., & Gao, Y. (2020). Revising HFACS for SMEs in the chemical industry: HFACS-CSMEs. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 65, 104138. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104138

Wang, J. and Qi, Y. (2022). A multi-user collaborative AR system for industrial applications. Sensors, Vol. 22, No. 4, p.1319. https://doi.org/10.3390/s22041319

Wann, C. (2014), System(s) integration, The journal of RMS in systems engineering, 6-10

Wardani, S., & Kusuma, I. W. (2020). Comparison of Learning in Inductive and Deductive Approach to Increase Student's Conceptual Understanding based on International Standard Curriculum. Journal Pendidikan IPA Indonesia, 9(1), 70-78. https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.21155

Waterson, P., & Kolose, S. L. (2010). Exploring the social and organisational aspects of human factors integration: A framework and case study. Safety Science, 48(4), 482-490. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.12.018

Wiegmann, D. A., & Shappell, S. A. (2001). Human error perspectives in aviation. The International Journal of Aviation Psychology, 11(4), 341-357. https://doi.org/10.1207/S15327108IJAP1104_2

Wiegmann, D. A., Wood, L. J., Solomon, D. B., & Shappell, S. A. (2021). Implementing a human factors approach to RCA²: tools, processes and strategies. Journal of Healthcare Risk Management, 41(1), 31-46. https://doi.org/ 10.1002/jhrm.21454

Wisner, A. (2015). Ergonomie et psychopathologie du travail. Travailler, (2), 31-43. https://doi.org/10.3917/trav.034.0031

-X-

Xiyun, L., Xi, W., Chenchen, L., & Shaohua, W. (2018, July). Application of virtual reality technology in nuclear power plant control room simulator. In International Conference on Nuclear Engineering (Vol. 51432, p. V001T04A004). American Society of Mechanical Engineers. https://doi.org/10.1115/ICONE26-81163

-Y-

Yasuda, Y. D., Cappabianco, F. A., Martins, L. E. G., & Gripp, J. A. (2022). Aircraft visual inspection: A systematic literature review. Computers in Industry, 141, 103695. https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103695

Yu, F., Xue, Q., & Liu, M. (2017). Virtual human motion design and ergonomics analysis in maintenance simulation. In Advances in Applied Digital Human Modeling and Simulation (pp. 65-74). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41627-4_7

-Z-

Zafiharimalala, H., & Tricot, A. (2009). Vers une prise en compte de l'utilisateur dans la conception de documents en maintenance aéronautique. Actes PeCUSI09.63.

Zhan, Q., Zheng, W., & Zhao, B. (2017). A hybrid human and organizational analysis method for railway accidents based on HFACS-Railway Accidents (HFACS-RAs). Safety science, 91, 232-250. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.08.017

Zhao, D., & Lucas, J. (2015). Virtual reality simulation for construction safety promotion. International journal of injury control and safety promotion, 22(1), 57-67. http://doi.org/10.1080/17457300.2013.861853

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. https://doi.org/10.1016/j.net.2017.01.011

Zwingelstein, G. (1996). La maintenance basée sur la fiabilité. Hermès, 199.

ANNEXE 1

ASSEMBLÉE NATIONALE

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
LIBERTÉ - ÉGALITÉ - FRATERNITÉ

Bruno LE MAIRE

Député de l'Eure

Paris, le - 6 NOV. 2015

Cher Monsieur,

Je tiens par la présente à vous remercier très sincèrement de l'accueil chaleureux que vous avez bien voulu me réserver le 23 octobre dernier lors de mon déplacement à Belfort.

Je vous remercie également pour la parfaite organisation de la visite de l'Université de technologie de Belfort-Montbéliard, ainsi que pour la grande qualité de nos échanges.

Bravo pour votre travail d'innovation au service de la recherche française.

Vous renouvelant mes remerciements, je vous prie de croire, cher Monsieur, à l'assurance de mon amical souvenir.

Bruno LE MAIRE

Monsieur Fabien BERNARD
Ingénieur d'Etudes et de Recherche
Université de technologie de Belfort-Montbéliard
12, rue Thierry-Mieg
90010 BELFORT cedex

Palais Bourbon – 126 rue de l'Université – 75355 PARIS 07 SP – Tél. 01.40.63.67.95 – Fax 01.40.63.56.91
blemaire@assemblee-nationale.fr – secretariat@brunolemaire.fr

ANNEXE 2

Consideration of Human Factor in Aeronautical Maintainability

Fabien Bernard, Airbus Helicopters
Florence Bazzaro, University of Technology of Belfort-Montbéliard
Jean-Claude Sagot, University of Technology of Belfort-Montbéliard
Raphael Paquin, Airbus Helicopters

Key Words: Design For Maintainability (DFM), ergonomics, simulation tools, aeronautics

SUMMARY AND CONCLUSIONS

In order to better account for the human factors in maintenance activities, maintainability now takes into account the field of ergonomics. Design engineers try to integrate and validate this new requirement with the same consideration they give to the design constraints. However, previous scientific research highlights the lack of optimization or compromise between the design standards and the ergonomic requirements [1]. Therefore, the main goal of this paper is to establish which ergonomic skills and tools should be used and how they are utilized by design engineers to evaluate the human factor. We performed an in-depth observation of the maintainability department of helicopter manufacturers in France. Our results show that ergonomics is integrated in the design process by mainly considering the physical factors, by using engineering tools and not ergonomic tools.

1 INTRODUCTION

The aeronautic field, and more specifically the helicopter field, encounters technical and technological challenges every day, in between the design, production, quality, and maintenance cost constraints. One of the major challenges of aviation is aircraft maintainability, and in particular integrating the human factor to ensure safety, health and efficiency. In the scientific community, two main groups take an interest in this issue. Thus, some authors focus on the study of human errors in maintainability [2], others question more specifically the working conditions of maintenance operators [3] and the challenges in terms of machine and operators' safety.

The scientific work is based upon the use of several ergonomic methods and tools, mainly according to a prescriptive approach [2]. However, few studies in the field, with the exception of those related to human error, question the physical, cognitive, organizational characteristics which are at play when the maintenance operator performs his activity, whereas this activity is defined as long, complex [3], and may even have effects on human health (musculoskeletal disorders, workplace accidents, work stress). Thus, to solve this problem, our research focuses on how to better take into account the human factor in maintainability. Before finding any solutions to this problem, it seems essential to study what is being done in the industry. Specifically, in this paper, we will observe the practices of the maintainability department in a helicopter manufacturer in terms of taking into account the human factor in the maintainability studies. More precisely, we will concentrate our study on the ergonomics criteria and on the tools used during these maintainability studies.

First, we will present the general context of our work: maintainability and ergonomics. Afterwards, we will present our study on practices based on a survey conducted in the maintainability department. The result of this study will, in accordance with the literature in the field, show the limits of the tools and the methods which are associated with them when integrating ergonomics in maintainability.

2 PRELIMINARY WORK

2.1 Aeronautical maintainability

The aeronautical industry has made a critical observation about maintenance: the tasks are very expensive, achieving between 12% and 15% of the total airline costs per year [4]. Also, respecting the duration of each maintenance task, also referred to as MTTR (Mean Time To Repair) [3] is very important. Indeed, in the field of helicopters, “hours of maintenance / flight hours” ratios are a priority. Additionally, the maintainability is independent of other factors such as reliability, availability and the life cycle costs, among others [5][6]. Additionally, the French Association of Maintenance Engineers, AFIM, conducted a survey among a sample of over 2500 maintenance professionals from various trades in industrial and service sectors revealing that 62% of them consider their occupation as painful [7]. Improving the safety and safeguarding health remain major issues of maintainability studies.

These questions are all the more relevant in view of the standards set for forecast scheduling maintenance tasks. Indeed, ICAO (International Civil Aviation Organization) and ATA (Air Transport Association) define the standards which must be respected in order to increase availability while optimizing reliability, cost and maintainability [5][6]. According to the European standard EN 13303: 2010 "Maintenance and terminology of maintenance" [8],

978-1-5090-5284-4/17/$31.00 ©2017 IEEE

maintainability defines the "ability of a product to be maintained or repaired easily during maintenance operations that include functions for which it was designed". This standard also specifies that the maintainability "can be quantified through appropriate measures or indicators" by the expert design engineers in maintainability. Thus, in order to carry out objective and quantitative maintainability studies, design engineers use indicators as guidelines [9][10]. There is a lot of literature on the subject as one can identify 34 indicators used to assess maintainability, indicators divided into 3 categories: technical, economic and organizational [9]. For example, the physical or visual accessibility would be situated in the technical category [9], the maintenance cost would be situated in the economic category [9], and, finally, the level of training would be situated in the organizational category [9]. From these indicators, mainly technical, engineers try to extract ergonomic information.

2.2 Ergonomics approach in maintainability

Issues raised by the assessment of maintainability indicators, such as physical accessibility, directly concern the activities of the operator. Integrating the human factor through ergonomics seems to be a solution for solving them [11]. The International Ergonomics Association [12] defines ergonomics as “the scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance”. Additionally, IEA states that “practitioners of ergonomics and ergonomists contribute to the design and evaluation of tasks, jobs, products, environments and systems in order to make them compatible with the needs, abilities and limitations of people”. This association defines three fields of ergonomics that must be explored in all ergonomic studies: physical, cognitive and organizational ergonomics. This approach, based on the analysis of activity, seems interesting for our case because it suggests that maintenance activities are physically painful, that they sometimes induce a high cognitive load associated with a complex and unpredictable organization.

There is a need to integrate the field of ergonomics in the design for maintainability process. However, it seems that there are no ergonomic or human factor experts in a maintainability team [13] and that a design engineer uses little to no ergonomic tools. More precisely, the design engineer uses, essentially, maintainability indicators [9]. Consequently, the conclusions which are drawn on ergonomic requirements are not derived from any expertise or any specific ergonomist methods and tools [13]. Nevertheless, in different fields of industry, there are studies that assess ergonomics for the maintainability departments. These studies propose tools to analyze physical ergonomics like, for example, the visual field or the reach envelope and evaluate the posture and the effort of the operator in order to avoid fatigue through numerical simulation tools like Digital Human Modeling (DHM) and Computer Aid Design (CAD) [14]. Again, in the automotive sector, maintainability engineers can perform, thanks to personal grids, accessibility, disassembly and manipulability analyses [15]. These authors also introduce a tool to evaluate the posture during a maintenance task on a car. Another case study introduces a methodology and the associated tools to assess a posture during the maintenance of an industrial machine [16]. Again, Virtual Reality (VR) is also used to assess accessibility to anticipate future maintenance tasks [17]. These different studies focus on the use of tools, especially simulation tools, to extract ergonomic needs. However, using these tools is not the same thing as performing with ergonomic expertise, and these tools do not take into account all the aspects of a maintenance activity such as the cognitive load, the environmental factors etc. To better understand the practice of the maintainability actors, we propose to adopt an ergonomic perspective, and to study the gap between the ergonomic view of the maintenance activity and the tools which are actually used to carry out a wide ergonomic analysis in maintainability. Through a deep industrial observation of the practices in the maintainability department, we will illustrate human factor integration into maintainability

3 INDUSTRIAL OBSERVATION

To illustrate the scientific literature through industrial practices, an in-depth observation has been carried out in the maintainability department of an aeronautical company in order to identify a main point: how are the ergonomic skills and tools integrated into the process of design for maintainability? To successfully achieve the goal in this study, we used a tool: a semi-directive survey. In order to prepare our survey, we set two objectives in accordance with previous literature observations:

- Objective 1: Know the actors’ business, training, jobs, types of projects and "knowledge level" in ergonomics, know the design for maintainability process
- Objective 2: Identify the "ergonomics and tools associated" used by the actors in the design for maintainability process in the helicopter field in order to evaluate the ergonomics in maintainability.

3.1 Survey

The semi-directive survey is composed of twelve questions. Three weeks have been necessary to carry out fifteen 45-minute interviews with the actors in the maintainability department. Questions are shaped in accordance with specific literature on survey designing [18]. The survey is divided into two parts.

The first part focuses on general information about the character through 8 questions. It identifies the individual by his age, occupation and training/background. Also, it will give us the means to map the knowledge and experience in ergonomics of each interviewee. The analysis of the answers will make it possible to achieve the objective 1. For this part, descriptive results, based on percentages, are presented.

The second part, which will answer the objective 2, assesses the ergonomic levels in maintainability through 5 questions. It focuses particularly on two points: ergonomic criteria and ergonomic assessment tools used in the service.

Traditionally, in an ergonomic study, different criteria and factors can be identified to analyze a work situation. To design this survey, in accordance with the literature and two ergonomists, we have identified and classified these different criteria into six categories. The table 1 shows these criteria and the main categories of criteria. These categories regroup different approaches of ergonomics: physical, cognitive and organizational. In the same way, regarding the ergonomic assessment tools, an analysis of the literature allowed us to extract 35 tools commonly used in ergonomic systems and production tools. These tools, as before, are classified by categories which have been defined. The table 2 introduces the categories of tools and the numbers of tools associated.

Table 1: ergonomic categories and criteria assessed

Categories of criteria	Criteria	REF
Environmental ambience (C_Env)	Atmospheric ambience	[19]
	Light ambience	[19]
	Soundscape	[19]
	Thermic ambience	[19]
	Vibration	[19]
Physical activity of the operators (C_Phy)	Range of motion	[20]
	Efforts	[20]
	Postures	[20]
Work activity organization (C_Org)	Workstation layout	[21]
	Autonomy	[22]
	Safety of work area	[22]
	Training	[22]
	Monotony	[23]
	Repetitively	[23]
	Duration of activity	[22]
	Duration of effort	[24]
Sensorial and cognitive activity of the operators (C_Cog)	Cognitive load of the task	[22]
	Human error	[25]
	Decision latitude	[25]
	View field	[22]
	Feedback understanding	[26]
Occupational health (C_Health)	Work accident	[26]
	Complaints of operators	[22]
Characteristics of the operators (C_op)	Anthropometry	[21]
	Background and experience	[26]

For this part, we are looking to identify the quality of the consideration given to each criteria studied and the quality of the consideration given to each tool which has been used, for each category of criteria. Each tool is independent and does not measure the same criteria. Consequently, for each category of criteria, we calculated the average percentage of the studied criteria and of the tools used by each maintainability actor. If a category is defined by 5 criteria and 7 tools, and if the maintainability actor deals with only 1 criterion and 2 tools, we obtain a score of 20 % for the criteria and a score of 28,5% for the tools. To explore the maintainability actor's quality of consideration of each category and the relationship between the diversity of the studied criteria and the used tools, we compare, thanks to the t-student test, by repeated measures, the average percentage of the studied criteria and the average percentage of the used tools. Indeed, the more the studied criteria, the more there should be of studied tools.

Table 2: ergonomic tool categories and tools assessed

Categories of tools	Numbers of Tool
Environmental ambience measurements (T_Env)	7
Physical activity measurements (T_Phy)	11
Work activity organization measurements (T_Org)	5
Sensorial and cognitive activity measurements (T_Cog)	7
Occupational health (T_Health)	2
Measurements of operators characteristics (T_op)	3

3.2 Results

Fifteen people between 20 and 39 years old, with an average age of 28.8 (SD = 5.58), were interrogated. Among this panel, there are 26% of technicians and the rest, 74%, are represented as design engineers. Only one engineer confirms having followed a training in ergonomics during his schooling. However, they affirm that they have acquired a skill and knowledge in ergonomics through their work experience: 67% in physical ergonomics, 40% in organizational ergonomics and only 7% in cognitive ergonomics. Firstly, we studied the category of criteria chosen by the person interrogated as illustrated in Table 3 (column N). Out of the 15 respondents, 14 (93 %) selected the category of criteria which had to do with the physical activity of the operators. 10 (66 %) respondents selected the category of criteria which had to do with work activity organization, sensorial and cognitive activity and operators' characteristics. Two categories of criteria were less studied. Environment characteristics were studied by only 40 % of the respondents, and criteria related to organizational health were studied by only 46,7 % of respondents. This first result shows clearly that four categories among six are studied by more than half of the respondents.

In order to go further, we looked to identify the quality of consideration of each studied criteria and each used tool for each category of criteria. First of all, we noticed that inside three categories, more than fifty percent of the criteria are studied (physical activity: 78,6 % of the criteria are studied, occupational health: 57,1 % and operators' characteristics: 55 %). To complete our study, we compared, within each category, the average difference between the percentage of studied criteria and the percentage of used tools. More specifically, we compared the average criteria and tools used by the population having affirmed that they had studied the categories associated. The table 3 and figure 1 describe the results

Table 3: statistic of criteria and tools of each category

Name	N	Mean	Standard deviation
C_Env	6	46,7	24,2
T_Env		14,3	12,8
C_Phy	14	78,6	28,1
T_Phy		13,0	9,2
C_Org	10	33,8	13,2
T_Org		16,0	15,8
C_Cog	10	30,0	10,5
T_Cog		20,0	21,1
C_Health	7	57,1	18,9
T_Health		14,3	24,4
C_Op	10	55,0	15,8
T_Op		13,3	17,2

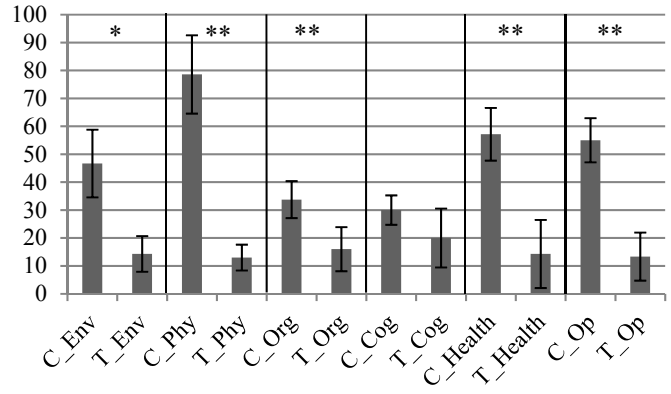


*Figure 1: Average percentage of studied ergonomics criteria and used tools (*p < 0.05; ** p < 0.01).*

The t-student test shows significant differences of averages in five categories among six, differences between the studied ergonomic criteria and the tools used in the maintainability service: environmental ambiance ($t(5)=2.89$; $p < 0.05$), physical activity ($t(13)=8.75$; $p < 0.01$), work activity organization ($t(9)=3.66$; $p < 0.05$), occupational health ($t(6)=6.00$; $p < 0.01$) and measurement of the operator's characteristics ($t(9)=5.00$; $p < 0.01$). Indeed, the descriptive results indicated in table 3 show that, in each category, less than 20 % of the tools are used by the engineers, whereas more than 30 % of the criteria are studied. More precisely, within three categories, that is to say physical activity, occupational health and operators' characteristics, more than 50 % of the criteria are studied, achieving 79% for the physical activity. Consequently, our results clearly show that a large variety of criteria are studied, but only a few tools are used to explore these criteria.

The most important difference of average between the studied ergonomic criteria and the used tools is within the category of physical activity. Indeed, 79% of the criteria of this category are studied, but only 13 % of the tools related to this category are used. We explored more precisely the different tools used. Results are illustrated in figure 2. Our results show that only two tools are used by the majority of actors in maintainability: direct observation with personal or standard grid. Indeed, the personal grid during a direct observation is used by 54% of the population. For 34%, the grid is based on standards. Other tools are used by one or two people and three tools, such as the accelerometer, are not used. Within the other categories, results are similar. It appears clearly that the tools which are being used are essentially personal or standard grids, whatever the studied criteria.

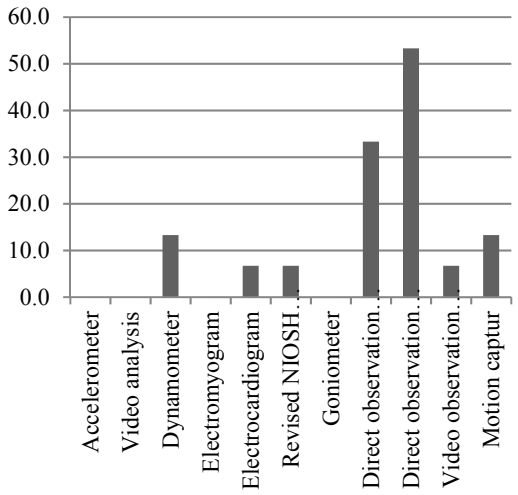


Figure 2: Percentage of ergonomics tools in physical activity category

4 DISCUSSION

To integrate the human factor into the maintenance, maintainability engineers must integrate ergonomics [2, 3]. However, the ergonomist is not present in the maintainability service. Indeed, different authors show that maintainability actors use different prescriptive tools, not related to ergonomic expertise [14, 15, 16, 17]. Consequently, some aspects of the maintenance activity, such as the cognitive load or environmental factors, do not seem to be dealt with. To better understand the practice of the maintainability actors, we studied an industrial observation conducted in the maintainability department of a helicopter manufacturer in France to determine which ergonomic skills and tools should be used and how they are they utilized by design engineers to evaluate human factor. Our results show that actors in maintainability take into account ergonomics through four major factors in ergonomics (physical, organizational, cognitive and sensorial, as well as operator's characteristics).

Some authors in maintainability focus only on the physical activity of the operator and the associated measurement [14, 15, 16, 17]. In these approaches, ergonomics is studied through physical characteristics like collision, effort, or the visual field among others. With these parameters, engineers will optimize a design for the system to work faster during a maintenance operation. In this work, the operator's activity is not taken into account. Indeed, cognitive and organizational characteristics can be considered, but in a

very low proportion. Our results highlight the gap between this approach and the practices. Indeed, these categories of criteria are studied, but through few criteria, less than forty percent.

In the same way, the classical ergonomic tools associated with these categories are hardly used, less than twenty percent. Consequently, we can suppose that the maintainability actors are aware of the need to deal with these ergonomic problematics, but try to deal with them with few tools, not necessarily adapted. For example, Di Gironimo et al. (2004), in their studies, develop a methodology to improve and quantify disassembly, accessibility and manipulability analyses. They state that the first stage of the methodology is to decompose the action in tasks. This approach can be compared to an organizational analysis in ergonomics [12], but the authors do not propose any tools to quantify organizational criteria.

Moreover, whatever the categories, ergonomic tools are not really used, except the personal or standardized grid, such as illustrated in our results with the categories related to physical activity. Ergonomic tools dedicated to specialists in this field are not used. Indeed, design engineers and ergonomists belong to two different fields, with specific skills and knowledge for each one. It seems obvious that an engineer cannot have the knowledge and the expertise of an ergonomist, preferring to integrate ergonomics with his own feelings and tools without the precision of an ergonomics expert, but understanding the importance of human factor in design [12], more especially in maintainability where the operator is at the center of the design. So, there is a real determination to study human factor through ergonomic criteria, especially "environmental ambience", "physical activity", "occupational health" and "measurements of operator's characteristics", but it is not sufficient to carry out a wide and complete ergonomic analysis. The expertise of the human factor expert is built on the analysis of the operator's activity. Indeed, the ergonomist must observe, analyze, understand the activity of the operator to draw conclusions on the risk factor (physical, organizational, cognitive, etc.) for the operator's health in relation to the realization of the activity [12]. But to support their ergonomic observations, without strong skills in this field, engineers use tools that they know very well: digital simulation tools like digital mockup, digital manikins, virtual reality.

For example, Regazzoni, & Rizzi propose to use digital mock-up and digital human modeling to simulate maintenance activity. In the same way, Di Gironimo et al explore the potential of virtual reality in maintainability. Simulation tools are also used by ergonomists to carry out activity analysis, proving their efficiency at covering all categories of indicators, organizational, economical and technical, integrating the human factor very early in the design process [9, 27]. Indeed, a large majority of human-factor researchers [28, 29, 30] are focused on the advantages of using simulation tools in the product/workplace design and developing processes to analyze this activity. These simulation tools can be used to simulate the potential [29] or desirable future activity [1], and can play an important role during the design [32, 33, 34]. So, it seems that the simulation tools can be a new way to support a better integration of ergonomics in the maintainability process.

5 CONCLUSION

Through this industrial observation conducted in a helicopter manufacturer, we have confirmed the observations made in the literature on the subject. The ergonomics is integrated in the design process mainly by a physical approach using engineering tools and not ergonomic tools. However, our results also show the awareness of maintainability actors concerning the need to integrate other factors such as organizational and cognitive. The practice studies conducted in a maintainability service highlight the need to propose tools dedicated to engineers which would allow them to better take into account the human factor. This proposition seems to offer a good compromise, to cover all the engineering requests, many ergonomists would be necessary.

In the near future, we will investigate the maintainability indicators through simulation tools. More specifically, we will try to propose a methodology taking into account physical, but also cognitive and organizational ergonomics. This approach should be based on existing tools used by engineers in maintainability: numerical simulation tools or physical models.

REFERENCES

1. Sagot, J. C., Gouin, V., & Gomes, S. (2003). "Ergonomics in product design: safety factor. Safety science", 41(2), 137-154.
2. Shanmugam, A., & Paul Robert, T. (2015). "Human factors engineering in aircraft maintenance: a review." Journal of Quality in Maintenance Engineering, 21(4), 478-505.
3. Chang, Yu-Hern, and Ying-Chun Wang. (2010) "Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians." Safety science 48.1, 54-62.
4. 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.
5. Dhillon, B. S., and Y. Liu (2006). "Human error in maintenance: a review." Journal of Quality in Maintenance Engineering 12.1, 21-36.
6. 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.
7. AFIM. (2004) 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.
8. CEN/TC319.EN13306:2010, Maintenance-maintenance terminology. European Standard, Bruxelles 2010
9. 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
10. Berrah, Lamia (2002). "L'indicateur de performance: Concepts et Applications. Cépadues-Editions
11. Falzon, P. (2004). "Ergonomie". Presses universitaires de France.
12. International Ergonomics Association. (2000). What is ergonomics. IEA Members" and "Study Programs".(nd) Available at http://www. iea. cc/index. php.
13. 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.
14. Shi, Y., & Liu, Y. (2012, August). "Application of DELMIA on Maintainability Design of Aircraft." In Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling. Atlantis Press.
15. 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.
16. Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). "Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability." Computer-Aided Design and Applications, 11(1), 10-19.
17. 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.
18. Bradburn et al., (2004). "Asking Questions: The Definitive Guide to Questionnaire Design : For Market Research, Political Polls, and Social and Health Questionnaires"
19. Parsons, K.C (2000). "Environmental ergonomics: a review of principles, methods and models." Applied ergonomics, 31(6), 581-594
20. 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
21. 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).
22. 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.
23. 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.
24. Cafakelli, E., Cain, W. S., & Stevens, J. C. (1977). "Effort of dynamic exercise: influence of load, duration, and task." Ergonomics, 20(2), 147-158.
25. Carayon, P., & Smith, M. J. (2000). "Work organization and ergonomics." Applied ergonomics, 31(6), 649-662.
26. Salvendy, G. (2012). "Handbook of human factors and ergonomics." John Wiley & Sons.
27. 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.
28. 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.
29. Maline, J., & Pretto, J. (1994). "Simuler le travail: une aide à la conduite de projet." Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail
30. Daniellou, F. (2007). "Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. " Activités, 4 (2), 77-83
31. 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).
32. 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).
33. 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).
34. Lorisson, J. (2010). "Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus." Techniques de l'ingénieur TE, 5, 965

BIOGRAPHIES

Bernard F., PhD candidate, MEng
Service ETVAM
Aéroport International, Marseille-Provence
13725 Marignane Cedex, France

e-mail: Fabien.bernard@airbus.com

Fabien Bernard (MEng & Ph.D candidate) worked two years as research engineer in UTBM before starting his Ph.D in maintainability department of Airbus Helicopters France.

Bazzaro F., PhD
University of Technology of Belfort-Montbéliard
Research Team: Ergonomics and System Design (ERCOS)
Belfort cedex, 90010, France

e-mail: florence.bazzaro@utbm.fr

Florence Bazzaro (PhD) is associate professor on the Univ.

Bourgogne Franche-Comté, more precisely, on UTBM in the ERCOS team. She teaches in the department of Ergonomics, Design and Mechanical Engineering (EDIM).

Sagot J-C., Full Professor
University of Technology of Belfort-Montbéliard
Research Team: Ergonomics and System Design (ERCOS)
Belfort cedex, 90010, France

e-mail: jean-sagot.sagot@utbm.fr

Jean-Claude Sagot (Full professor) is a head of the research team Ergonomics and System Design (ERCOS) at UTBM in the Univ. Bourgogne Franche-Comté. He teaches in the department of Ergonomics, Design and Mechanical Engineering (EDIM).

Paquin R., Maintainability engineer
Service ETVAM
Aéroport International, Marseille-Provence
13725 Marignane Cedex, France

e-mail: raphael.paquin@airbus.com

Raphaël Paquin is Maintainability Team Leader at Airbus Helicopters, and working in this dpt since 2006. He introduced Virtual Reality in Design Office to assess & improve maintainability on new aircraft during development phase.

Applied Ergonomics 65 (2017) 410–417

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Ergonomics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apergo

Physical risk factors identification based on body sensor network combined to videotaping

Nicolas Vignais [a, b, c, *], Fabien Bernard [a], Gérard Touvenot [a], Jean-Claude Sagot [a]

[a] ERCOS Research Unit, Systems & Transport Laboratory, University of Technology of Belfort-Montbéliard, 91010 Belfort, France
[b] CIAMS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France
[c] CIAMS, Université d'Orléans, 45067 Orléans, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 15 August 2016
Received in revised form
4 May 2017
Accepted 4 May 2017
Available online 18 May 2017

Keywords:
Physical ergonomics
Inertial measurement unit
Manual tasks
Risk of exposure
Musculoskeletal disorders

ABSTRACT

The aim of this study was to perform an ergonomic analysis of a material handling task by combining a subtask video analysis and a RULA computation, implemented continuously through a motion capture system combining inertial sensors and electrogoniometers. Five workers participated to the experiment. Seven inertial measurement units, placed on the worker's upper body (pelvis, thorax, head, arms, forearms), were implemented through a biomechanical model of the upper body to continuously provide trunk, neck, shoulder and elbow joint angles. Wrist joint angles were derived from electrogoniometers synchronized with the inertial measurement system. Worker's activity was simultaneously recorded using video. During post-processing, joint angles were used as inputs to a computationally implemented ergonomic evaluation based on the RULA method. Consequently a RULA score was calculated at each time step to characterize the risk of exposure of the upper body (right and left sides). Local risk scores were also computed to identify the anatomical origin of the exposure. Moreover, the video-recorded work activity was time-studied in order to classify and quantify all subtasks involved into the task. Results showed that mean RULA scores were at high risk for all participants (6 and 6.2 for right and left sides respectively). A temporal analysis demonstrated that workers spent most part of the work time at a RULA score of 7 (right: 49.19 ± 35.27%; left: 55.5 ± 29.69%). Mean local scores revealed that most exposed joints during the task were elbows, lower arms, wrists and hands. Elbows and lower arms were indeed at a high level of risk during the total time of a work cycle (100% for right and left sides). Wrist and hands were also exposed to a risky level for much of the period of work (right: 82.13 ± 7.46%; left: 77.85 ± 12.46%). Concerning the subtask analysis, subtasks called 'snow thrower', 'opening the vacuum sealer', 'cleaning' and 'storing' have been identified as the most awkward for right and left sides given mean RULA scores and percentages of time spent at risky levels. Results analysis permitted to suggest ergonomic recommendations for the redesign of the workstation. Contributions of the proposed innovative system dedicated to physical ergonomic assessment are further discussed.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

According to the International Ergonomics Association, "ergonomists contribute to the design and evaluation of tasks, jobs, products, environments and systems in order to make them compatible with the needs, abilities and limitations of people" (IEA, 2016). From a physical point of view, an ergonomic intervention aims at detecting and evaluating the disequilibrium between workplace requirements and workers physical abilities in order to prevent work-related musculoskeletal disorders (MSDs). After a physical ergonomic analysis, recommendations may be provided for the primary design of a workplace (Sanchez-Lite et al., 2013) or for the redesign of a workplace (Greene et al., 2005). Thus, developing supportive tools for the identification and assessment of potentially hazardous motor tasks and postures appears crucial for ergonomic research.

* Corresponding author. CIAMS, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91405 Orsay Cedex, France.
E-mail addresses: nicolas.vignais@u-psud.fr (N. Vignais), fabien.bernard@utbm.fr (F. Bernard), gerard.touvenot@utbm.fr (G. Touvenot), jean-claude.sagot@utbm.fr (J.-C. Sagot).

http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2017.05.003
0003-6870/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Different methods and tools have been developed for assessing exposure to risk factors for work-related MSDs. These methods can be classified in three groups: self-reports observational methods and direct measurements (Li and Buckle, 1999; David, 2005). Self-reports involve worker diaries, interviews and questionnaires. Despite their ease of implementation, self-reports have been associated with subjective drawbacks like the unreliability of exposure perception or interpretation according to the worker's literacy.

The aim of observational methods is to evaluate workplace exposure by assessing the worker's motor behavior on paper sheets either while observing in the field or replaying videos (Engström and Medbo, 1997). One of the most cited observational methods is the Rapid Upper Limb Assessment (RULA) index, which is based on postures observation (biomechanical and postural load parameters) to provide a score of exposure to MSDs, with particular attention to the neck, trunk and upper limbs (McAtamney and Corlett, 1993). Reliability of this method adapted to specific contexts has been assessed through different studies (Takala et al., 2010; Dockrell et al., 2012; Levanon et al., 2014). Observational methods have been implemented into videotaped specific softwares (Yen and Radwin, 1995; Chang et al., 2010; Radwin, 2011) even though this process is usually time-consuming. More simply, videotaping is a standard tool in ergonomics as it permits to divide a work cycle in different key elements, denoted as subtasks (Hernández-Arellano et al., 2016). The amount of time spent during each of these subtasks can also be deduced as a percentage of the work cycle (Armstrong et al., 2014). Although observational methods are affordable and practical for use in a wide range of professional situations, the scoring system may suffer from a lack of epidemiological data (David, 2005).

Finally, direct methods aim at measuring the risk of exposure in real-time by using sensors attached to the worker's body (Radwin and Lin, 1993; Freivalds et al., 2000; Breen et al., 2009; Bernmark and Wiktorin, 2002; Sanchez-Lite et al., 2013; Peppoloni et al., 2016). Although this kind of methods have been known to require complex implementation and cost-intensive hardware setup (David, 2005), low-cost systems based on inertial measurement units (IMU) have been introduced by manufacturers, e.g. MTx (XSens, Netherlands), Trigno (Delsys, USA), or CAPTIV Motion (TEA, France). In 2013, some researchers presented an IMU system able to provide a real-time ergonomic assessment of the upper body into an industrial environment (Vignais et al., 2013). Based on the RULA method, this system computed both a standard global risk score and several local risk scores (one per segment). This evaluation was fed back to the user in real-time by using a see-through head mounted display coupled to auditory warnings, thus allowing reducing the risk of MSDs in industrial settings. Along the same lines, Battini and colleagues introduced a full-body system dedicated to real-time ergonomic evaluations of manual material handling tasks and composed of 17 inertial measurement units (Battini et al., 2014). Although the feedback was only visual (portable screens or personal computers), this system integrated some of the most used methodologies, such as RULA, OCRA, OWAS, or the Lifting Index, thus given the possibility to the user/ergonomist to select the suitable methodology (Andreoni et al., 2009). In the aerospace manufacturing industry, an inertial measurement system has been used to capture human activity for ergonomic assessment and digital modelling (Fletcher et al., 2016). Compared to traditional ethnographic methods, inertial data demonstrated a better suitability for human performance monitoring and digital human modelling.

While promising, previous studies did not exploit the whole potential of continuous data provided by IMU system, even offline. Thus the aim of this study was to conduct an ergonomic analysis of a manual material handling task by associating videotaping and RULA computation implemented continuously through a motion capture system combining IMU and electrogoniometers. This in-field apparatus permitted to identify awkward subtasks and thus orientated the ergonomic recommendations for the redesign of the workstation.

2. Materials and methods

2.1. Subjects

Five experienced workers took part to this study. Participants' mean age, height and mass were 41.2 ± 11, 1.69 ± 0.14 m and 70.8 ± 23.56 kg, respectively. All participants gave their informed consent before participating to the study. It has to be noticed that all participants were traditionally in charge of the workstation studied.

2.2. Workstation

The workstation described in this study aims to clean filters dedicated to medical material (see Fig. 1). More precisely, the worker had to clean each subpart of the filter, to put subparts together, to vacuum the filter, and then to check the quality of the vacuuming. Then, each filter was placed inside a packet and sealed using a vacuum sealer.

2.3. Materials

In this section, the data collection process based on IMUs and electrogoniometers have been introduced. From those data, the subsequent offline ergonomic computation based on RULA sheet has been described.

2.3.1. IMU system

This system was composed of seven wireless CAPTIV Motion IMUs (TEA, Nancy, France). Each lightweight sensor (32 g, 60 × 35 × 19 mm) contains a tri-axial accelerometer, a tri-axial gyroscope and a tri-axial magnetic sensor. All sensors were sampled at 64 Hz. The IMUs were placed on the worker's body using manufacturer's guidelines and specific adjustable straps: one IMU for each upper arm, one IMU for each forearm, one IMU for the head, one IMU for the trunk, located on the chest, and one IMU for the pelvis, placed on the sacrum (see Fig. 2). This last IMU was necessary to define the movement of the trunk with respect to the pelvis segment.

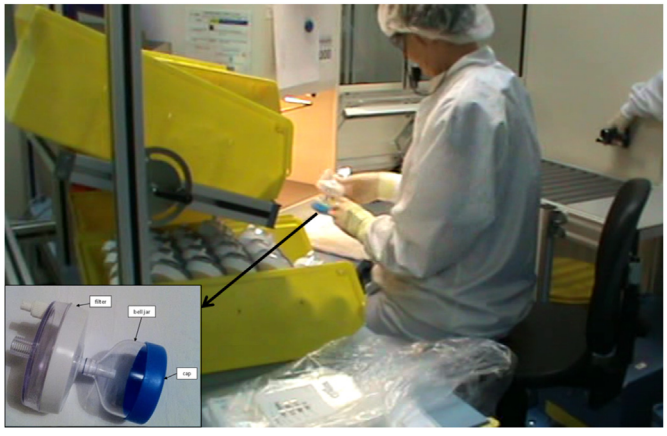


Fig. 1. Workstation dedicated to filter cleaning and description of the filter.

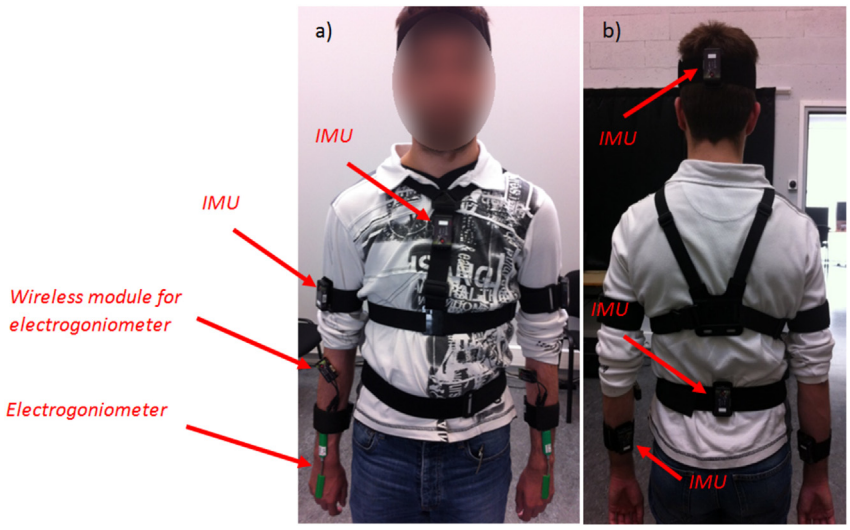


Fig. 2. Placement of IMUs, electrogoniometers and their wireless modules in the front (a) and back views (b).

2.3.2. Goniometers

To record wrist angles (flexion/extension, radial/ulnar deviation), two bi-axial electrogoniometers (Biometrics Ltd., Newport, UK) have been added to the on-body sensor network (see Fig. 2) and placed on both sides of the wrist using medical tape and straps. They were sampled at 32 Hz and synchronized with the IMUs during the post-processing through CAPTIV software (TEA, Nancy, France).

2.3.3. Camcorders

Two camcorders have been used to film worker's activity. One camcorder was fixed on a tripod placed to the rear up of the worker (see viewpoint in Fig. 1). One camcorder was hold by the experimenter during the whole recording to capture postures of the worker's forearms and hands, especially on the right side of the workstation while the worker opened and closed the vacuum sealer (see Fig. 1).

2.4. Procedure

The workstation being in a sterile environment, the worker was equipped with the IMU system and goniometers in the gowning room. At this time she/he was also informed with the aim of the study. Then the worker was asked to wear the professional clothes (coat, charlotte, goggles, and gloves) and go to the workstation situated 30 m away from the gowning room. At the workstation, all sensors were zeroed using a calibration posture (standing posture with upper limbs along the body, hands turned inside). This posture was also used at the end of the experiment to verify that the IMU signals have not been disturbed through the work cycles. Both camcorders were synchronized to the IMU system and goniometers through a specific step into CAPTIV software. The worker was asked to perform 30 cycles of the task, which corresponds to 20 min of work.

2.5. Post-processing

The analysis was conducted on the 10 cycles situated in the middle of the work done. Wrist, elbow, shoulder, neck and back joint angles were deduced from the on-body sensor network through a biomechanical model developed by the manufacturer (TEA, 2014). This model was composed of 20 degrees of freedom.

Joint angles were then used to compute automatically a global risk score based on the RULA method (McAtamney and Corlett, 1993). For a current posture, this global score ranged from one to seven as follow: 1–2 corresponded to an acceptable posture; 3–4 meant that the current posture needed further investigation and that a change may be needed; 5–6 meant that the current posture needed further investigation and that it had to be changed soon; 7 meant that the movement could lead to MSDs, that it had to be investigated and changed immediately. By computing the RULA scores at each time step, the percentage of time spent at each range was deduced.

Some specific parameters of adjustments were also necessary to compute the RULA score:

- Shoulder raising: as the worker did not raise his arm upward during the task, the 'shoulder raising score' was fixed to 0.
- Upper arm abduction: the upper arm adduction/abduction angle was computed by the IMU system so a score of +1 was added to the 'upper arm score' when this angle was superior to 45° (in the frontal plane).
- Arm supported: during the whole task, the worker did not support her/his arms so the 'arm supported score' was fixed to 0.
- Arm working across midline or out to side of body: it was deduced from the video analysis that either worker's arms were working across midline of the body, either worker's arms worked out to side of body, throughout most of the task. Thus we added +1 to the 'lower arm score'.
- Wrist bending from midline: the IMU system computed the radio-ulnar deviation angle so a score of +1 was added to the 'wrist score' when this angle was inferior to −10° (radial deviation) or superior to 10° (ulnar deviation).
- Neck and trunk twist: the IMU system provided these angles so a score of +1 was added to the 'neck score' and/or 'trunk score' when these angles were inferior to −10° or superior to 10°.
- Neck and trunk side bending: similarly, a score of +1 was added to the 'neck score' and/or 'trunk score' when these angles were superior to 10° laterally.
- Legs and feet supported: as legs and feet were supported during the whole task, the 'leg score' was fixed to 1.
- Muscle use score: this score was fixed to 1 as the worker repeated some subtasks more than four times per minute.
- Force/load score: this score was fixed to 0 as the filter held by the worker was small and light (largely under 2 kg).

In addition to the global risk score, an articulation-based analysis was conducted based on the following predefined local scores thresholds (Vignais et al., 2013):

- Shoulder and upper arm: 5
- Elbow and lower arm: 3
- Wrist and hand: 5
- Neck and head: 4
- Pelvis and trunk: 4

For each articulation generating a local score higher than the corresponding predefined value, the frequency of appearance was computed.

Concerning the subtask identification, a research technician, with more than 20 years of experience on ergonomic analyses, used both video observations to manually code each worker's activity. This process was performed through CAPTIV software.

3. Results

3.1. Mean RULA scores and percentage of time spent at each RULA range

On average, participants performed the 10 work cycles with a global RULA score of 6 ± 0.87 for the right side and 6.2 ± 0.78 for the left side, meaning that the average posture used by the workers needed further investigation and it had to be changed soon (McAtamney and Corlett, 1993).

Percentages of time showed that the workers spent the biggest part of their time at a range of 7 (right: 49.19 ± 35.27%; left: 55.5 ± 29.69%) (see Fig. 3). At ranges 5–6, they spent 35.63 ± 14.13% for the right side, and 34.82 ± 13.62% for the left side. Finally, the percentage of time a low risk of MSDs (ranges 3–4) was 15.18 ± 9.21% for the right side and 9.67 ± 7.38% for the left side.

3.2. Mean local scores and percentage of time spent at a risky level

Workers' local scores have been summarized in Table 1. According to predefined values (see section 2.5), 'Shoulder and upper arm', 'Neck and head' and 'Pelvis and trunk' scores were under the risky threshold, 'Elbow and lower arm' scores were over the threshold as well as 'Wrist and hand' scores.

Based on the same predefined values, the percentage of time an articulation/segment spent at a risky level was deduced (see Fig. 4). Results demonstrated that elbows and lower arms were at a high level of risk during a work cycle (100% for right and left sides). Wrist and hands were also exposed to a risky level for much of the period of work (right: 82.13 ± 7.46%; left: 77.85 ± 12.46%). It has to be noticed that the pelvis and trunk spent 41.47 ± 40.34% of the work time at a risky level, followed by the neck and head (23.08 ± 11.98%) and shoulders and upper arms (right: 0.2 ± 0.29; left: 12.45 ± 5.03).

3.3. Subtask analysis

A subtask analysis was performed based on the videotaping of all subtasks inside each work cycle. Thus each subtask was associated to mean RULA scores (right and left) and mean local scores (see Table 2).

From Table 2, one can observe that the posture associated to the highest RULA score was 'snow thrower' for the right side, and 'opening the vacuum sealer' for the left side. Thus, shoulder and upper arm were most exposed during these two tasks for the right and left sides, respectively. Concerning elbow and lower arm, there were more at risk during 'opening the vacuum sealer' for the right and left sides. The 'cleaning' subtask was the most awkward for the right wrist and hand, the 'storing' subtask being the riskiest for the left wrist and hand. The neck and head were most exposed during the 'snow thrower' subtask, whereas pelvis and trunk were most at risk during the 'storing' subtask.

Moreover, each subtask was associated to the percentage of time spent at each RULA range, and the percentage of time an articulation/segment spent at a risky level (see Table 3). We can observe that the subtask which exposed the worker to a RULA score equal to 7 during the largest proportion of time was 'storing' for the right side, and 'snow thrower' for the left side. Elbows and lower arms clearly appeared the most at risk during the task as these articulations and segments spent 100% of time at a risky level. For the wrists and hands, the 'cleaning' and 'assembly' subtasks induced the largest proportion of time at a hazardous level for the right and left sides, respectively.

4. Discussion

This study aimed to demonstrate the interest of coupling a continuous ergonomic assessment, based on IMUs and electrogoniometers, to subtask videotaping during a work cycle. This methodology was applied to a filter cleaning workstation in a biomedical material manufacture. The ergonomic assessment was based on the RULA method as operators were working in a sitting posture. Computing joint angles in continue allowed to deduce (for

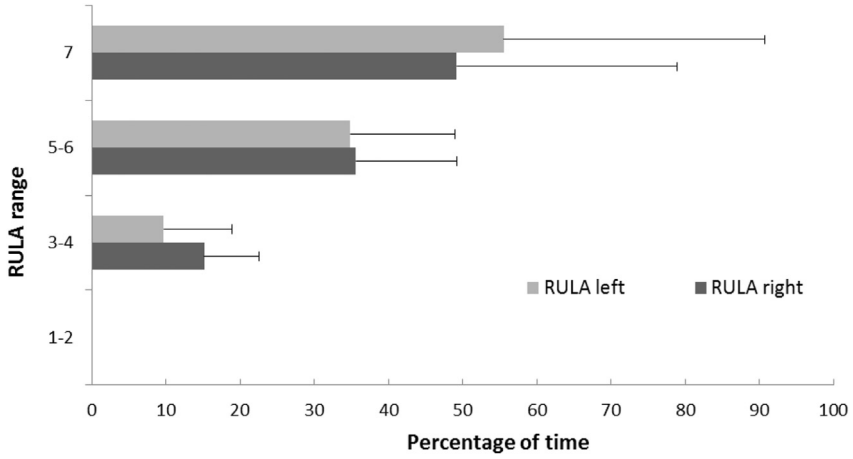


Fig. 3. Percentage of time spent at each RULA range.

Table 1
Mean local scores and standard deviations (SD).

	Shoulder and upper arm score		Elbow and lower arm score		Wrist and hand score		Neck and head score	Pelvis and trunk score
	Right	Left	Right	Left	Right	Left		
Local scores	2.91[a]	3.38[a]	3.27[b]	3.34[b]	5.16	5.05	2.51	3.2
SD	0.75	0.9	0.43	0.44	0.83	0.78	1.29	0.53

[a] Prior hypotheses: shoulder was not raised, upper arms were not supported or the worker was not leaning during a work cycle.
[b] Prior hypothesis: lower arms were working across midline or out to side of body (+1).

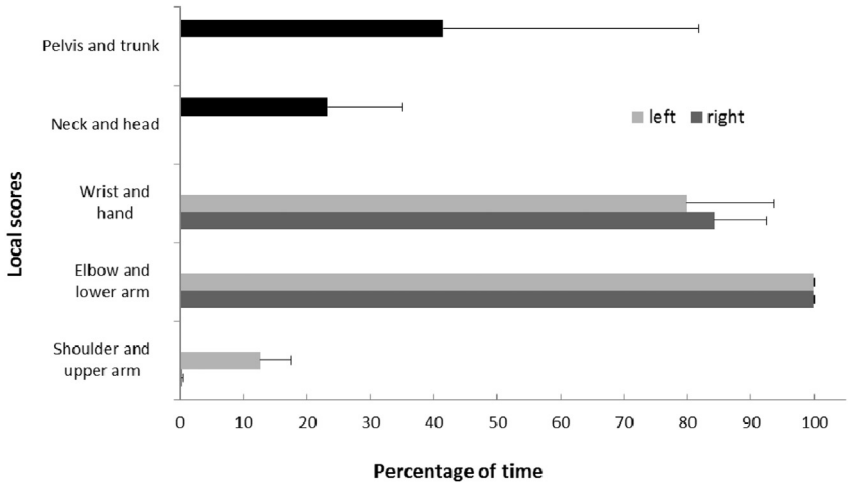


Fig. 4. Mean percentage of time an articulation/segment spent at a risky level for all work cycles.

Table 2
Mean RULA scores and mean local scores (±standard deviation) associated to each subtask.

	Mean RULA score		Shoulder and upper arm score		Elbow and lower arm score		Wrist and hand score		Neck and head score	Pelvis and trunk score
	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left		
Assembly	5.64 ± 1.2	5.90 ± 1.09	2.59 ± 0.82	2.93 ± 0.72	3.10 ± 0.07	3.29 ± 0.32	5.09 ± 0.23	5.15 ± 0.11	2.41 ± 0.43	3.00 ± 0.89
Bell jar holding	6.15 ± 1.00	6.25 ± 0.79	3.32 ± 0.46	3.49 ± 0.52	3.24 ± 0.42	3.49 ± 0.22	4.98 ± 0.51	5.09 ± 0.41	2.41 ± 0.85	3.21 ± 0.79
Cap holding	6.15 ± 0.76	6.56 ± 0.46	2.62 ± 0.92	3.68 ± 0.28	3.10 ± 0.22	3.54 ± 0.18	4.94 ± 0.33	5.05 ± 0.31	2.91 ± 1.09	3.04 ± 0.94
Cleaning	5.92 ± 1.14	6.06 ± 1.00	2.85 ± 0.27	3.28 ± 0.46	3.03 ± 0.03	3.23 ± 0.22	5.38 ± 0.14	5.04 ± 0.26	2.35 ± 1.01	3.16 ± 0.84
Closing the vacuum sealer	6.45 ± 0.45	6.59 ± 0.45	2.76 ± 0.58	3.91 ± 0.61	3.45 ± 0.30	3.60 ± 0.19	5.21 ± 0.15	4.96 ± 0.27	2.72 ± 0.81	3.57 ± 0.39
Filter holding	6.06 ± 1.24	6.04 ± 1.33	2.51 ± 0.59	2.58 ± 0.89	3.09 ± 0.07	3.35 ± 0.18	5.23 ± 0.24	5.01 ± 0.25	2.73 ± 0.39	3.36 ± 0.78
Miscellaneous	6.25 ± 0.51	6.35 ± 0.46	3.09 ± 0.47	3.49 ± 0.96	3.47 ± 0.36	3.39 ± 0.31	4.93 ± 0.13	4.71 ± 0.68	2.48 ± 0.43	3.33 ± 0.46
Opening the vacuum sealer	6.23 ± 0.84	6.73 ± 0.22	3.58 ± 0.51	4.60 ± 0.39	3.83 ± 0.10	3.76 ± 0.17	4.79 ± 0.56	5.08 ± 0.39	2.58 ± 1.64	3.32 ± 0.81
Pack checking	6.28 ± 0.80	6.42 ± 0.66	2.71 ± 0.58	3.45 ± 0.43	3.24 ± 0.47	3.06 ± 0.05	4.74 ± 0.33	5.05 ± 0.66	3.09 ± 0.96	3.39 ± 0.76
Packaging	5.75 ± 1.11	5.96 ± 0.97	2.63 ± 0.80	3.09 ± 0.42	3.23 ± 0.32	3.23 ± 0.30	5.34 ± 0.22	5.03 ± 0.58	2.37 ± 0.61	3.11 ± 0.69
Removing from the vacuum sealer	6.06 ± 0.73	6.34 ± 0.66	2.66 ± 0.74	3.59 ± 0.35	3.34 ± 0.22	3.15 ± 0.22	4.98 ± 0.40	5.21 ± 0.48	2.55 ± 0.74	3.32 ± 0.69
Snow thrower	6.57 ± 0.46	6.65 ± 0.51	3.60 ± 0.34	3.62 ± 0.61	3.52 ± 0.46	3.30 ± 0.38	5.29 ± 0.30	4.85 ± 0.58	3.21 ± 0.77	3.35 ± 0.63
Storing	6.51 ± 0.44	6.62 ± 0.37	2.98 ± 0.24	3.60 ± 0.69	3.38 ± 0.28	3.33 ± 0.16	4.99 ± 0.26	5.24 ± 0.19	3.12 ± 0.35	3.61 ± 0.50

the right and left sides): mean RULA scores, percentages of time spent at each RULA range, mean local scores and percentages of time each articulation/segment spent at a risky level. The combination with videotaping permitted a deeper analysis based on each subtask composing the work cycle. Thus each subtask was associated to: a mean RULA score, percentages of time spent at each RULA range, a local score per articulation/segment, and percentages of time each articulation/segment spent at a hazardous level.

Results from this study showed that mean RULA scores were at a high level of risk for both sides (6 and 6.2 for right and left sides, respectively), meaning that the workstation involved hazardous postures during the work cycle (McAtamney and Corlett, 1993). These RULA scores appeared considerably higher to previous continuous RULA assessments during manual tasks (Vignais et al., 2013; Peppoloni et al., 2016). This global preliminary indication has been completed by percentages of time spent at each RULA range, which revealed the temporal aspect of the risk of exposure to MSDs. These percentages demonstrated that workers spent half of the work cycle at a RULA score equal to 7 with few differences between right and left sides. This variable was a clear indicator of the risk of MSDs, as it took into account the temporal aspect of the ergonomic assessment. Further modifications of the workstation would have to decrease those percentages to validate the future ergonomic approach.

After these global risk assessments, it was interesting to identify which anatomical region was more at risk in the worker's body.

Table 3
Duration, percentage of time spent at each RULA range and percentage of time an articulation/segment spent at a risky level, per subtask.

	Mean duration (s)	Percentages of time at each RULA range										Percentages of time each articulation/segment spent at a risky level											
		Right RULA ranges				Left RULA ranges						Shoulder and upper arm		Elbow and lower arm		Wrist and hand				Neck and head		Pelvis and trunk	
		1–2	3–4	5–6	7	1–2	3–4	5–6	7			Right	Left	Right	Left	Right		Left					
Assembly	21.3 ± 12.8	0	29.46 ± 38.8	26.02 ± 24.14	44.52 ± 40.54	0	17.75 ± 31.83	34.92 ± 41.23	47.32 ± 37.25	0		1.43 ± 2.18		100		100	85.30 ± 15.38		88.99 ± 6.19	8.49 ± 4.90		0.71 ± 1.60	
Bell jar holding	6.7 ± 1.6	0	14.12 ± 30.8	28.79 ± 36.78	57.10 ± 39.75	0	9.28 ± 17.08	33.22 ± 39.88	57.51 ± 38.79	0.09 ± 0.19		5.12 ± 8.87		100		100	78.95 ± 23.90		80.28 ± 18.74	21.66 ± 24.66		0	
Cap holding	8.5 ± 6.5	0	13.14 ± 14.2	35.93 ± 22.24	50.93 ± 38.33	0	4.18 ± 3.84	26.13 ± 15.92	69.69 ± 29.62	0		4.60 ± 10.28		100		100	84.46 ± 27.29		78.15 ± 15.00	33.66 ± 34.67		5.25 ± 11.73	
Cleaning	56.5 ± 29.2	0	18.33 ± 16.25	31.73 ± 18.52	49.94 ± 45.28	0	9.43 ± 8.45	40.05 ± 23.03	50.52 ± 44.87	0.03 ± 0.06		1.64 ± 2.64		100		100	93.89 ± 3.15		85.07 ± 10.65	7.69 ± 12.00		0.77 ± 1.72	
Closing the vacuum sealer	7.9 ± 4.8	0	5.06 ± 4.23	32.56 ± 13.01	62.39 ± 26.8	0	5.20 ± 5.69	19.46 ± 6.85	75.34 ± 16.38	0		47.06 ± 19.43		100		100	89.24 ± 6.84		75.85 ± 14.59	11.26 ± 17.92		0.74 ± 1.21	
Filter holding	9.2 ± 7.1	0	21.64 ± 21.57	27.81 ± 16.7	50.54 ± 43	0	20.14 ± 20.14	20.31 ± 10.09	59.56 ± 40.46	0		1.47 ± 2.95		100		100	91.00 ± 8.58		72.98 ± 11.78	4.15 ± 1.10		0	
Miscellaneous	21.4 ± 65.8	0	10.99 ± 4.15	28.65 ± 10.13	60.36 ± 26.43	0	7.43 ± 4.24	30.01 ± 11.38	62.56 ± 27.03	0.26 ± 0.52		28.22 ± 35.49		100		100	76.23 ± 9.88		61.52 ± 35.46	8.76 ± 6.05		1.12 ± 1.97	
Opening the vacuum sealer	18.9 ± 8.7	0	8.00 ± 5.87	36.67 ± 20.05	55.33 ± 43.69	0	0.77 ± 0.69	21.20 ± 10.97	78.03 ± 17.75	1.15 ± 2.50		74.73 ± 24.28		100		100	61.58 ± 24.73		79.13 ± 21.03	17.68 ± 34.95		1.53 ± 3.41	
Pack checking	4.4 ± 7.3	0	8.32 ± 6.88	37.35 ± 21.78	54.33 ± 49.51	0	2.19 ± 2.19	42.05 ± 30.38	55.76 ± 49.12	0		0		100		100	71.61 ± 23.70		72.99 ± 34.62	17.27 ± 22.72		3.22 ± 5.41	
Packaging	31.2 ± 23.3	0	20.24 ± 15.54	41.56 ± 14.92	38.20 ± 40.11	0	11.64 ± 10.46	34.44 ± 11.73	43.07 ± 41.28	0		4.61 ± 8.09		100		100	88.79 ± 5.97		73.72 ± 23.85	5.09 ± 9.22		0.87 ± 1.94	
Removing from the vacuum sealer	7.7 ± 5	0	9.89 ± 8.11	48.44 ± 17.35	41.67 ± 38.2	0	5.59 ± 6.09	41.94 ± 22.08	52.47 ± 40.78	0		0		100		100	74.18 ± 15.76		84.96 ± 21.91	3.45 ± 4.17		1.40 ± 3.02	
Snow thrower	13.1 ± 12.3	0	0.69 ± 0.77	34.18 ± 22.32	65.13 ± 40.87	0	1.50 ± 1.53	20.18 ± 15.06	78.32 ± 24.37	0		16.24 ± 32.27		100		100	90.85 ± 8.14		66.67 ± 31.76	34.49 ± 28.90		0.70 ± 0.96	
Storing	11.8 ± 7.6	0	3.09 ± 2.16	31.75 ± 12.71	65.16 ± 26.84	0	1.06 ± 0.53	28.12 ± 13.78	70.82 ± 28.15	0.47 ± 1.06		14.00 ± 22.45		100		100	70.91 ± 12.01		86.59 ± 10.72	22.31 ± 21.81		5.07 ± 7.01	

Local scores have been computed to this aim and associated to risk thresholds. These scores showed that the elbows, lower arms, wrists and hands suffered from hazardous postures used during the work cycle in average. This outcome was confirmed by the temporal variable, i.e. percentages of time each articulation/segment spent at a hazardous level, as elbows and lower arms spent the whole work cycle time at a risky level. Wrists and hands were at risk during more than three quarters of work time. As the operator had to accurately manipulate the different parts of the filter in different places of the workstation (vacuum sealer, bell jar, packaging, storing, etc.) during the task, it may explain why lower arms and hands were the most exposed. In top of giving an anatomical localization of the risk of exposure, this variable could orientate the further modification of the workstation. Thus, the future workstation would ideally have to reduce the movements of lower arms (by decreasing the workspace and the position of the useful elements for instance) and hands (by adapting the height of the workstation to each operator for example).

It has to be noted that large standard deviations associated with the percentage of time spent at the RULA range of 7 (see Fig. 3) were probably related to high standard deviations associated with the percentage of time pelvis and trunk spent a risky level (see Fig. 4). Indeed, these interindividual variations were probably due to large anthropometric differences between the five subjects of this experiment (see subsection 2.1). As an example, the smaller subject in height was 1.55 m (subject 3) while the taller subject in height was 1.90 m (subject 5). Therefore, subject 5 most likely had to constantly bend down his trunk while working on the workstation, thus leading to a high pelvis/trunk local score, and subsequently a high global RULA score.

The main contribution of this experiment consisted in the combination of the subtask analysis. By combining videotaping with RULA continuous assessment, we have been able to identify the most risky subtasks. The highest RULA scores were obtained for the subtasks 'snow thrower', 'storing', 'closing' and 'opening the vacuum sealer'. The significance of 'snow thrower' and 'storing' subtasks for the risk of exposure to MSDs was supported by the percentage of time spent at the 7 RULA range. Thus future ergonomic modifications of the workstation have to focus on the procedure of these subtasks, and their associated postures. For example, the 'snow thrower' subtask was currently performed by placing and holding the filter into a box in front of the worker (orange area in the middle of Fig. 1). One modification could be to integrate a support inside the snow thrower permitting to decrease the time where lower arms were in extension. Concerning local scores per subtask, the subtask named 'opening the vacuum sealer' appeared particularly at risk for left shoulder and upper arm. Thus the position of the vacuum sealer into the workstation might be redesigned as well as the way to open it (another activation pedal might be conceived to this aim). Local scores also demonstrated that elbows and lower arms were a high level of risk during all subtasks. Consequently, a global redesign of the workstation would have to be implemented for elbows and lower arms, e.g. permitting to easily adjust the height of the work surface to each worker's anthropometric characteristics. Concerning wrists and hands, processes under 'cleaning' and 'storing' subtasks had to be redesigned and/or explained in details through specific training in order to decrease awkward postures. Nevertheless, the subtask analysis revealed that the neck and head, and pelvis and trunk, were not concerned by a high level of risk on average.

4.1. RULA method limitations

Concerning the ergonomic assessment, unless the RULA method has been widely applied in the ergonomic literature (David, 2005),

epidemiological data are missing to support the relationship between MSDs appearance and risk of exposure computation (Li and Buckle, 1999; Vignais et al., 2013). Some researchers are currently working on the developments on other objective measurements (Hansson et al., 2009) in order to assess the exposure-response relationships between occupational risk factors and musculoskeletal disorders (Nordander et al., 2016). However these types of studies have been dedicated to specific anatomical areas (neck, shoulder, forearm and/or wrist) although RULA score provided a global risk score for the whole worker's upper body. It has to be noted that some angles thresholds have to be chosen subjectively for the implementation of the RULA calculation in continue. For example, concerning the neck and head, RULA computation defined that if the neck was side bending, a local score of +1 had to be added. However, it was not detailed from which angle of the neck a side bending was considered. The same observation could be made for upper arm abduction, shoulder raising, radio-ulnar deviation, wrist twist, neck twist, and trunk twist and side bending. Some prior hypotheses had also to be done to allow the RULA score computation, e.g. the shoulder was not raised and upper arms were not supported or the worker was not leaning during a work cycle. The selection of local scores thresholds were along the same lines. Results showed that the percentage of time elbows and lower arms spent at a risky level was equal to 100%. As this threshold has been chosen subjectively, it could be suggested that it was too low to reflect the risk of exposure for this particular area. Concurrently with these calculations, the specific anatomical area of the lumbar zone, responsible for most of the MSDs around the world (Brooks, 2006), has been given little consideration through this assessment (Vignais et al., 2013). Finally, the RULA method, even if it permitted an analysis of temporal aspects in the current study, has been initially developed to focus on static postures. Thus through this method, it was not possible to analyze the influence of the cumulative time spent at each RULA range on the risk of MSDs exposure (Svensson et al., 2010).

4.2. Biomechanical limitations

Although few researches have been dedicated to temporal aspects of subtask ergonomic assessment in the literature, different points of the current applied protocol could be called into question. First of all, the biomechanical model deduced from IMUs and electrogoniometers suffered from a lack of validation, although it was certified applicable by the manufacturer (TEA, Nancy, France). An experimental protocol is currently under progress to validate the described biomechanical model with an optoelectronic system, based on the methods from Morrow et al. (2016).

4.3. Sample size limitations

In the current study, the small sample size could also be questionable. However, it has to be noted that the five subjects who took part to this experiment were the only five workers dedicated to this workstation. By adding non-specialist workers, we would have taken the risk of recording non representative motion patterns associated to this workstation. Thus the current study did not pretend to be as robust and representative as a genuine laboratory experiment, but it described a valuable case-study applied into a medical material manufacturing environment.

4.4. Practical implications

As the methodology of this study showed, combining different analysis tools may lead to a deep ergonomic assessment. In practice, it requires an organized protocol involving multiple experimenters to be in charge of sensors (attachments, calibration, and continuous monitoring during data collection) and video recording. It is recommended that after the operator is familiarized with the experimental setup, the effective measurement is taken for several cycles of the task. Although the battery capacity of the sensors could dictate the recording duration, a minimum of 10 cycles should be considered as a theoretical lower limit (Samani et al., 2015). Global results concerning mean RULA scores and percentages of time spent at each RULA range provide an overview of the ergonomic recommendation. Moreover, it may later be used as comparative measures to assess the impact of an ergonomic intervention. The computation of local scores and percentages of time an articulation/segment spent at risky level allow identifying the localization of the workstation that needs to be modified, e.g. the workspace dedicated to lower arms and hands. Finally, the subtask analysis gives a better insight about processes and tools that can be improved. As an example from this study, the vacuum sealer might be opened using an activation pedal to decrease the involvement of left shoulder and upper arm in the ‘opening the vacuum sealer’ subtask. Identified risky subtasks may also be subject to improved detailed processes or specialized training.

5. Conclusion

This study aimed to perform an ergonomic analysis of operators working on a workstation dedicated to filter cleaning for medical materials. The main contribution of this research consisted in combining continuous RULA assessment, based on on-body sensors network, with subtasks videotaping to provide ergonomic recommendations for the workplace redesign.

Thus right and left RULA scores were calculated at each time step to characterize the risk of exposure of the upper body. Local risk scores were also computed to identify the anatomical origin of the exposure. The video-recorded work activity was time-studied to classify and quantify all subtasks involved into the task. Results showed that RULA scores were at a risky level from average and temporal points of view. Mean local scores permitted to identify most exposed joints during the task, i.e. elbows, lower arms, wrists and hands. The subtask analysis allowed to detect ‘snow thrower’, ‘opening the vacuum sealer’, ‘cleaning’ and ‘storing’ subtasks as the most dangerous for the development of MSDs. Thus suggested ergonomic recommendations focused on these different subtasks. The methodology presented in this study may be transferred to other risky workstations in order to optimize redesign in an ergonomic manner and subsequently decrease the risk of exposure to MSDs.

Funding

This work was supported by private funds from Merck KGaA (Merck Millipore, Molsheim, France).

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the authors.

Acknowledgments

The authors would like to thank all workers that participated in this study, as well as Lucile Milard, Margot Pasquer and Clyde Vicot for their help to set up the experimental protocol.

References

Andreoni, G., Mazzola, M., Ciani, O., Zambetti, M., Romero, M., Costa, F., Preatoni, E.,

2009. Method for movement and gesture assessment (MMGA) in ergonomics. In: International Conference on Digital Human Modeling, San Diego, CA, USA, pp. 591–598.
Armstrong, T., Cao, C., Hallbeck, S., Radwin, R., Rempel, D., 2014, September. Ergonomic aspects of clinical and surgical procedures - discussion panel proposal. Hum. Fac. Erg. Soc. P 58, 924–928.
Battini, D., Persona, A., Sgarbossa, F., 2014. Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management. Comp. Ind. Eng 77, 1–10.
Bernmark, E., Wiktorin, C.C.P.S., 2002. A triaxial accelerometer for measuring arm movements. Appl. Ergon. 33, 541–547.
Breen, P.P., Nisar, A., Olaighin, G., 2009. Evaluation of a single accelerometer based biofeedback system for real-time correction of neck posture in computer users. In: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Annual International Conference, Minneapolis, Minnesota, USA, pp. 7269–7272.
Brooks, P.M., 2006. The burden of musculoskeletal disease e a global perspective. Clin. Rheumatol. 25, 778–781.
Chang, C.C., McGorry, R.W., Lin, J.H., Xu, X., Hsiang, S.C.P., 2010. Prediction accuracy in estimating joint angle trajectories using a video posture coding method for sagittal lifting tasks. Ergonomics 53, 1039–1047.
David, G.C., 2005. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. Occup. Med-Oxford 55, 190–199.
Dockrell, S., O'Grady, E., Bennett, K., Mullarkey, C., Mc Connell, R., Ruddy, R., Flannery, C., 2012. An investigation of the reliability of Rapid Upper Limb Assessment (RULA) as a method of assessment of children's computing posture. Appl. Ergon. 43 (3), 632–636.
Engström, T., Medbo, P., 1997. Data collection and analysis of manual work using video recording and personal computer techniques. Int. J. Ind. Ergon. 19 (4), 291–298.
Fletcher, S.R., Johnson, T.L., Thrower, J., 2016. A study to trial the use of inertial non-optical motion capture for ergonomic analysis of manufacturing work. Proc. Inst. Mech. Eng. B J. Eng. Manuf. https://doi.org/10.1177/0954405416660997.
Freivalds, A., Kong, Y., You, H., Park, S., 2000. A comprehensive risk assessment model for work-related musculoskeletal disorders of the upper extremities. Hum. Fac. Erg. Soc. P 44, 5728–5731.
Greene, B.L., DeJoy, D.M., Olejnik, S., 2005. Effects of an active ergonomics training program on risk exposure, worker beliefs, and symptoms in computer users. Work 24 (1), 41–52.
Hansson, G.Å., Balogh, I., Ohlsson, K., Granqvist, L., Nordander, C., Arvidsson, I., et al., 2009. Physical workload in various types of work: Part I. Wrist and forearm. Int. J. Ind. Ergon. 39 (1), 221–233.
Hernández-Arellano, J.L., Serratos-Perez, J.N., Coronado, P.P., 2016. Ergonomic assessment of material handling in CV joint assembly. Handb. Res. Manag. Strategies Achiev. Optim. Perform. Industrial Process. 101.
International Ergonomic Association (IEA), 2016. http://www.iea.cc/whats/index.html.
Levanon, Y., Lerman, Y., Gefen, A., Ratzon, N.Z., 2014. Validity of the modified RULA for computer workers and reliability of one observation compared to six. Ergonomics 57 (12), 1856–1863.
Li, G.Y., Buckle, P., 1999. Current techniques for assessing physical exposure to workrelated musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. Ergonomics 42, 674–695.
McAtamney, L., Corlett, E.N., 1993. RULA - a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Appl. Ergon. 24, 91–99.
Morrow, M.M., Lowndes, B., Fortune, E., Kaufman, K.R., Hallbeck, S., 2016. Validation of inertial measurement units for upper body kinematics. J. Appl. Biomech. 1–19.
Nordander, C., Hansson, G.Å., Ohlsson, K., Arvidsson, I., Balogh, I., Strömberg, U., et al., 2016. Exposure–response relationships for work-related neck and shoulder musculoskeletal disorders–Analyses of pooled uniform data sets. Appl. Ergon. 55, 70–84.
Peppoloni, L., Filippeschi, A., Ruffaldi, E., Avizzano, C.A., 2016. A novel wearable system for the online assessment of risk for biomechanical load in repetitive efforts. Int. J. Ind. Ergon. 52, 1–11.
Radwin, R.G., 2011. Automated video exposure assessment of repetitive motion. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 55, No. 1, pp. 995–996).
Radwin, R.G., Lin, M.L., 1993. An analytical method for characterizing repetitive motion and postural stress using spectral-analysis. Ergonomics 36, 379–389.
Samani, A., Pontonnier, C., Dumont, G., Madeleine, P., 2015. Kinematic synergy in a real and a virtual simulated assembly task. In: 19th Triennal Congress of the International Ergonomics Association, Melbourne, Australia.
Sanchez-Lite, A., Garcia, M., Domingo, R., Sebastian, M.A., 2013. Novel ergonomic postural assessment method (NERPA) using product-process computer aided engineering for ergonomic workplace design. PloS one 8 (8).
Svensson, E., Bertilsson, E., Högberg, D., Hanson, L., 2010. Review of the incorporation, utilization and future demands of ergonomic evaluation methods in digital human modeling. In: Annual Nordic Ergonomic Society Conference, Stavanger, Norway.
Takala, E.P., Pehkonen, I., Forsman, M., Hansson, G.Å., Mathiassen, S.E., Neumann, W.P., Winkel, J., 2010. Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work. Scand. J. Work Env. Hea 36 (1), 3–24.
TEA, 2014. T-sens Motion – Reference Angles. CAPTIV L7000 V2.1.21, technical report.
Vignais, N., Miezal, M., Bleser, G., Mura, K., Gorecky, D., Marin, F., 2013. Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing. Appl. Ergon. 44 (4), 566–574.
Yen, T.Y., Radwin, R.G., 1995. A video-based system for acquiring biomechanical data synchronized with arbitrary events and activities. IEEE T. Bio-Med. Eng. 42, 944–948.

Check for updates

SPECIAL SECTION: 2018 IEA Congress

Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability

Fabien Bernard, Airbus, Marignane, France and University of Technology of Belfort-Montbéliard–University of Bourgogne Franche-Comté, France, **Mohsen Zare**, **Jean-Claude Sagot**, University of Technology of Belfort-Montbéliard–University of Bourgogne Franche-Comté, France, and **Raphael Paquin**, Airbus, Marignane, France

Objective: This research aimed to evaluate the differences in the assessments made by three simulation tools used in a maintainability design office to perform human factor/ergonomics (HFE) analysis: digital human modeling (DHM), virtual reality (VR), and physical mock-up (PMU).

Background: Maintainability engineers use digital/physical simulation tools in the early design phase to analyze whether the design is well adapted for maintenance operators. Knowing the potential of these simulation tools would encourage maintainability stakeholders to integrate HFE in the design process more efficiently.

Method: Eleven maintenance tasks were analyzed from the participation of six maintenance operators. Various HFE indicators including physical, cognitive, and organizational indicators were assessed. Each operator repeated 11 maintenance tasks on VR and PMU. Based on the anthropometric parameters, six manikins were created to analyze 11 maintenance tasks on DHM.

Results: A significant difference was found for the organizational indicators between VR and PMU, whereas the physical and cognitive indicators are similar. DHM, VR, and PMU are compared with the common HFE indicators for the physical dimension and present a significant difference for individual tasks.

Conclusion: To reduce the gap between simulation tools, a better physical representation is requested on the VR platform, improving the perception of work sequences in the virtual world. Concerning DHM, a new paradigm is proposed to study a few tasks per work area instead of studying each task independently.

Application: This study will help develop a new methodology and tools specifically for non-HFE experts in the maintainability department.

Keywords: human factors, ergonomics, simulation tools, virtual reality, physical mock-up, maintainability, aeronautics

Address correspondence to Fabien Bernard, ERCOS Group (Pôle), Laboratory of ELLIADD-EA4661, University of Technology of Belfort-Montbéliard–University of Bourgogne Franche-Comté, 90010 Belfort Cedex, France; e-mails: Fabien.bernard@utbm.fr, Fabien.bernard@airbus.com.

HUMAN FACTORS
Vol. 62, No. 1, February 2020, pp. 37–54
DOI: 10.1177/0018720819861496
Article reuse guidelines: sagepub.com/journals-permissions
Copyright © 2019, Human Factors and Ergonomics Society.

INTRODUCTION

Human Factors in Maintenance

Human performance has been studied from the very beginning in the aviation field, especially regarding aircraft accidents (Maurino, Reason, Johnston, & Lee, 2017; Wiener & Nagel, 1988). Initially, the reliability of machines was the primary concern, and many attempts were made to improve the technology of the devices (Maurino et al., 2017; Wiener & Nagel, 1988). During the following decades, human factors/ergonomics (HFE) raised as a discipline to design the flight deck and to investigate the interaction between human (pilot) and machine, particularly, during the training phase of the pilot in a simulator (Horeman, Akhtar, & Tuijthof, 2015; Wiener & Nagel, 1988). Safety and comfort in the cockpit and the passenger cabin were also improved by considering HFE principles during the subsequent decades (Spenser, 2008). However, 12% of all aviation accidents were due to HFE issues during maintenance activity (Hobbs, 2000). Integrating HFE in maintainability may increase the quality of maintenance activities and reduce the rate of mistakes/errors (Gruber, De Leon, George, & Thompson, 2015). The design engineers in the maintainability department interact and collaborate with other engineering departments (e.g., aerodynamic, hydraulic and electric integration, and architecture), and raising HFE culture between them could effectively affect the future maintenance activity.

However, aviation accidents are not the only problem that demonstrates the need to improve HFE for maintenance activities. The health and safety of maintenance operators is also a key

contributor to maintenance errors (Hobbs, 2000). Various studies have already highlighted the fact that maintenance activities can cause health problems (musculoskeletal disorders, stress, and high mental workload) and workplace accidents (French Association of Maintenance Engineers (AFIM; 2004; European Agency for Safety and Health at Work, 2010). In a survey of 2,500 maintenance operators from various industries (automotive, train, and aeronautics), AFIM showed that 62% of respondents considered their occupation to be dangerous. Another study performed in Europe showed that 15%–20% of accidents at work occurred in the field of maintenance, suggesting that maintenance tasks are the most dangerous activities in an industry (European Agency for Safety and Health at Work, 2010).

Simulation Tools for Assessing Human Factors

The design engineers simulate the maintenance activities in the digital mock-up (DMU) and physical mock-up (PMU) to integrate HFE in the design process of maintainability in the early design phase (Stoffregen, Bardy, Smart, & Pagulayan, 2003). They proactively analyze the future maintenance activity, either in a DMU or in a PMU, by different ergonomic tools. The DMU can be categorized into two simulation tools: digital human modeling (DHM) and virtual reality (VR). DHM allows the integration of ergonomics in the preliminary phases of the design process of the product, manufacturing, and maintenance (Ahmed, Gawand, Irshad, & Demirel, 2018; Krüger & Nguyen, 2015; Perez, de Looze, Bosch, & Neumann, 2014). Various types of DHM tools have been developed. Rasmussen, Damsgaard, Christensen, and Surma (2002) presented the AnyBody digital manikin, which aims to couple the specific geometric criteria of a future product with the ergonomic requirements of a multidisciplinary optimization approach. Jack manikins (EAI-UGS) have been used in various industries to evaluate HFE indicators (disassembly, accessibility, usability) on maintenance tasks (Di Gironimo, Monacelli, & Patalano, 2004). The Human Builder is the most frequently used manikin tool in the aviation field and presents various useful characteristics (visual fields, posture analysis, anthropometric measurements, and biomechanical single action analysis) for maintainability studies (Hashim, Kamat, Halim, & Othman, 2014; Nishanth, Muthukumar, & Arivanantham, 2015). Geng, Zhou, Lv, and Wang (2013) propose a methodology to improve the use of ergonomics options for the human builder to anticipate the risks of maintenance activities on the auxiliary power unit of a plane. According to these authors, the visual field, reach envelope, and the rapid upper limb assessment (RULA) score are the existing options for studying the manikin's interactions with its environment in maintainability. Another study attempts to assess the occupational risks of the semiautomatic pump manufacturing industry using the human builder (Nishanth et al., 2015). However, DHM cannot anticipate the full activity of the real operators, and it is difficult to make decisions and validate the design based solely on DHM. Quintero-Duran and Paul (2016) explain the limitations of using DHM during the design development stage. These authors highlight the fact that the influence of design on the human's behavior cannot be simulated and anticipated with DHM studies. It is also not possible to observe psychosocial and environmental stressors, which presents a limitation in the study of human factors using DHM. Johnson and Fletcher (2015) have detailed the subjectivity of human factor analysis with DHM because the manikins' degrees of freedom are not always representative.

For this reason, VR is used—as a typical DMU tool—to study the operator's accessibility and the interaction with the architecture, particularly in maintainability (Amundarain, Borro, Matey, Alonso, & de Guipúzcoa, 2003). VR is easy to edit and cost-effective, and the aviation industry uses it to evaluate the ergonomic features of a task, whereas PMU is less predominant when simulating maintenance tasks (Shi & Liu, 2012). The virtual setting is not sufficient to consider all aspects of HFE in the design process, and PMU is utilized to design space forms and architectural aesthetic. However, this design approach is technocentric design (more focused on technology) whereas the anthropocentered design (interactions between operators and the architecture) might be more suitable, which will

consider organization, mental processes (e.g., perception, reasoning), and motor responses (Bittencourt, Duarte, & Béguin, 2017; Czerniak, Brandl, & Mertens, 2017; Das & Sengupta, 1996; Meister, 2014; Sagot, 1999).

The background/experience of the engineers allowed them to focus almost entirely on the physical dimension of HFE (Bernard, Bazzaro, Paquin, & Sagot, 2017; Bernard, Zare, Sagot, & Paquin, 2019; Broberg, 2007). The maintainability engineers may underutilize the potential of DMU and PMU for performing ergonomic analyses on simulated maintenance tasks due to their lack of HFE skills and knowledge (Sharma, Singhal, & Sonia, 2018). Few studies have investigated the contribution made by DMU and PMU to the design process, and more specifically, the complementary aspect of VR and PMU. Although various DHM tools have already been compared in previous studies (Duffy, 2016; Lämkull, Hanson, & Örtengren, 2009) there is very little literature concerning the contribution of DHM, VR, and PMU during the design process (Pontonnier, Dumont, Samani, Madeleine, & Badawi, 2014). Recent studies have demonstrated the possibility of applying VR and augmented reality for ergonomic studies in the design process, but they concluded the significant difference between real and virtual settings results (Aromaa & Väänänen, 2016; Pontonnier et al., 2014).

The challenge in the maintainability department of the aeronautical industry is to integrate better HFE, using simulation tools (DHM, DMU, and PMU) during the design phases. We hypothesize that engineers use the simulation tools more efficiently for assessing ergonomic factors when they know the differences and complementary aspects of these tools. The first step in this proposed improvement is to study the existing disparity between the simulation tools. This study was, therefore, designed to investigate the difference in the assessments of HFE indicators made by DHM, VR, and PMU.

THE CONTEXT OF THE STUDY

Maintainability is defined as the ability of a product to be maintained/repaired easily during maintenance operations that include the functions for which it was designed (EN 13306:2010, 2010). Maintenance tasks are expensive for the aeronautical industry, reaching between 12% and 15% of an airline's total costs per year (Čokorilo, 2011). Furthermore, the duration of each maintenance task (referred to as the mean time to repair, MTTR) must be respected (Chang & Wang, 2010). The ratio of "hours of maintenance/flight hours" is a priority in the helicopter industry. Maintainability stakeholders must anticipate the future maintenance operator's activities in three main ways: the item's architecture, the operator's tools, and the operator's ways of working (Lee, Ma, Thimm, & Verstraeten, 2008). However, it can be challenging to predict the human activity involved in maintenance for maintainability engineering, mainly by taking customer feedback into account.

More than half of maintenance professionals from various industrial and service sectors interviewed in a survey believed that their occupation is hard (French Association of Maintenance Engineers, AFIM). Health and safety are, therefore, the significant maintenance issues that should be studied further.

To study maintenance activity, we focus our analysis on the upper deck of a helicopter, where the engine is located as illustrated in Figure 1. The maintenance tasks performed on the engine were complicated due to the reduced accessibility and the limited available workspace.

METHOD

Research Setting

The PMU used for our experiment represents the upper deck. The scaffold is created to provide access to the right/left engine for the operators. Figure 2 shows the top view of the upper deck. The maintenance operation is carried out from the corridor of the maintenance scaffolding. The maintenance tasks are carried out on both the left and right sides, depending on the arrangement of the technical elements (asymmetrical tasks). Some tasks must/can be performed through hatches requiring standing, kneeling, or lying postures.

Maintenance Tasks Selected

Eleven maintenance tasks were evaluated on the upper deck (Table 1). We selected these

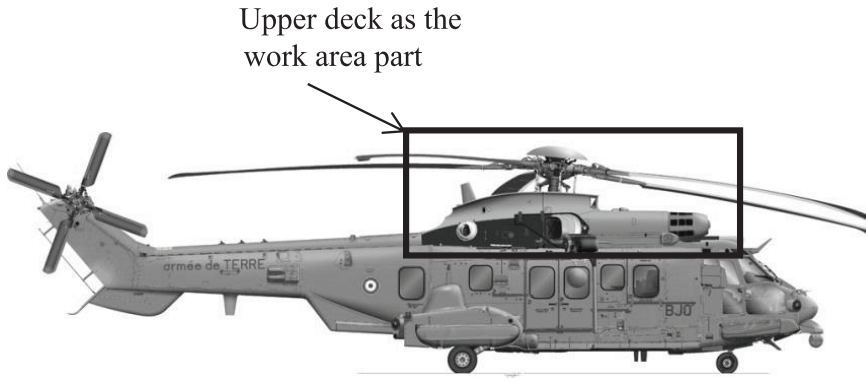


Figure 1. Helicopter representation with the upper deck as the work area.

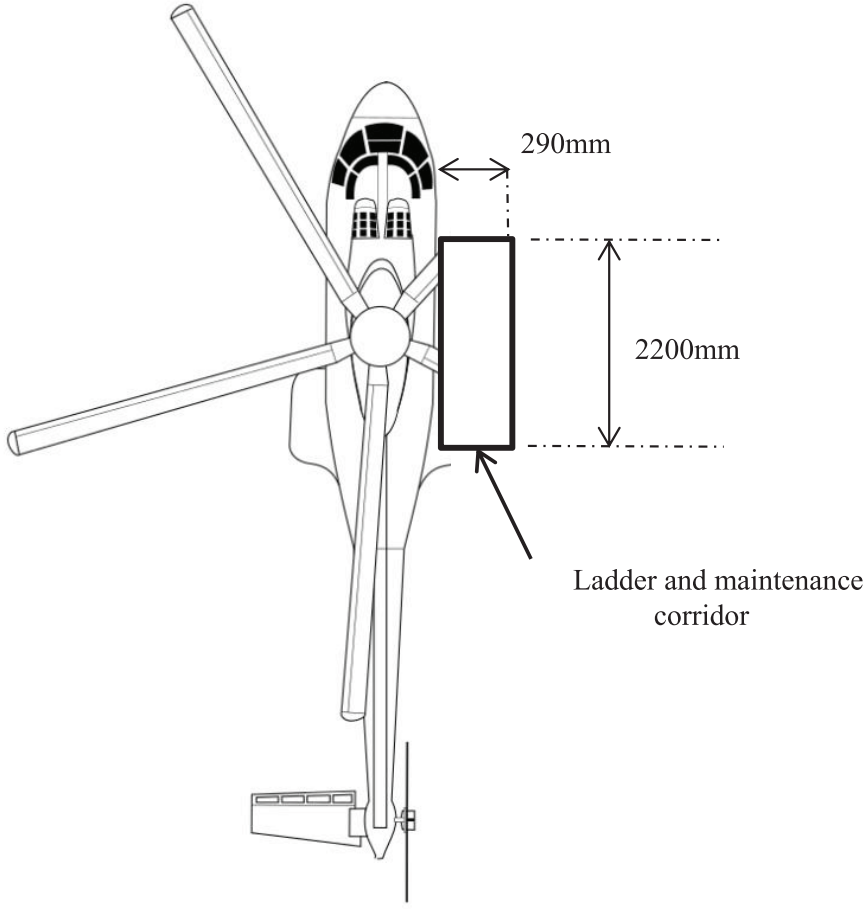


Figure 2. Top view of the upper deck layout with ladder and maintenance corridor on the right side (the same is installed on the left side).

TABLE 1: Description of Each Task and the Main Postures Associated

Task	Description	Main Posture
1	Manipulation of the ladder and upper deck to anchor them	Standing
2	Disassembly/assembly of the main generator	Standing and bending
3	Manipulation of the electric plug behind the firewall	Kneeling
4	Manipulation of engine electric plug (floor)	Kneeling/lying down
5	Disassembly/assembly of the hydraulic pump	Kneeling/standing
6	Verification of the drain collector	Kneeling
7	Disassembly/assembly of the auxiliary generator	Standing and bending
8	Disassembly/assembly of engine support	Lying down
9	Tightness check of the RPM	Kneeling
10	Tightness check of the suspension support	Kneeling
11	Tightness check of the primary rotor actuator	Kneeling

tasks because of their recurrence and representativeness among other maintenance tasks of the helicopter and plane, particularly, regarding the parameters of posture, gestures, and effort. Various studies in the aviation field have confirmed the interest of the engine part in performing HFE analysis (Amundarain et al., 2003; Dmitriev, Burlakov, Popov, & Popov, 2015; Geng et al., 2013), particularly because of the variability of tasks and work postures (Lockett & Arvanitopoulos-Darginis, 2017; Lu, Zhou, & Li, 2015; Shi & Liu, 2012). In addition, the tasks selected in our study are included as part of regular and mandatory maintenance activities—the most frequent task (Task 1), which is performed every week, and the least frequent task (Task 7), which occurs once a month. Furthermore, all the maintenance tasks have a theoretical duration estimated using the mean time measurement (MTM) method (Laring, Forsman, Kadefors, & Örtengren, 2002); this theoretical duration was taken as a reference in our experiment to compare with the real time needed to perform the tasks on VR and PMU.

Specification of Simulation Tools

As the study was conducted in the aerospace industry, we used the "Human Builder" simulation tool, which is already employed by many maintainability engineers in various industries (Geng et al., 2013; Nishanth et al., 2015). The maintainability design engineer performs design analysis with a computer-aided design (CAD) software system (CATIA). This CAD integrates a DHM that is easily accessible for all design office stakeholders and that gives the option of carrying out ergonomic analyses and validating the design environment. The technical inputs, such as the weight of the manipulated parts and the duration of the tasks, came from other departments of the design office. The maintainability stakeholders performed the simulation with various statures (Figure 3).

The VR technology used by the helicopter manufacturer was realistic human ergonomic analysis (RHEA), and we used this technology for the experiment. The VR is based on "Virtools" software and is included in the design process, allowing a fast transfer between the CAD and VR platform. Real operators performed 11 maintenance tasks simulated in the VR platform. The physical interactions, such as contacts with the architecture of the upper deck, assembling/disassembling elements that represent real volume, the real weight of the components, and the sensors on the components to carry them virtually, were created on VR (Boy, 2018) to synchronize the virtual and real world (Figure 4). We could, therefore, keep the simulation setting as close as possible to the usual process and the current industrial context. The VR platform is composed of a VR headset (Oculus Rift) worn by the operator performing the maintenance tasks. The VR headset view was displayed on the screen, which was shared with the virtual work setting, including the operator's avatar (reproducing the behavior of the real operator). This output ensures a full

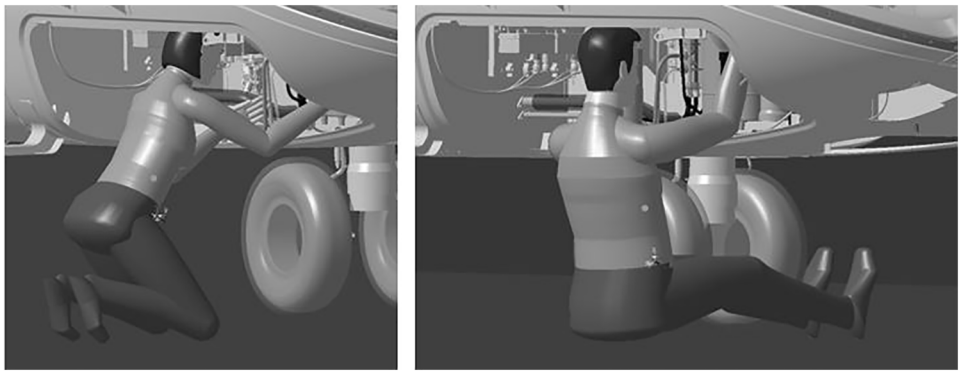


Figure 3. Interaction of the human builder manikin with the environment for the same task: on the left, 5th percentile female and on the right 95th percentile male.

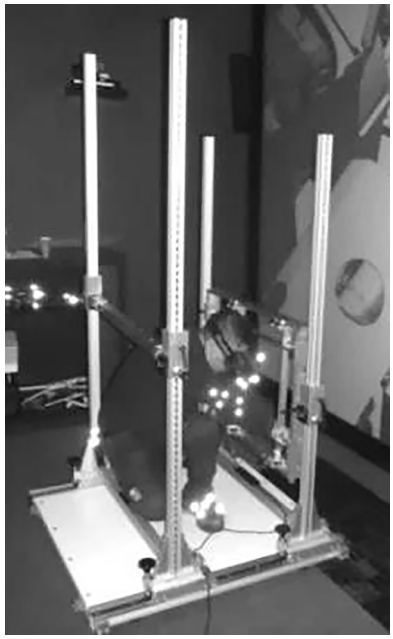


Figure 4. Physical part integrated during the virtual reality simulation.

observation by maintainability stakeholders in the room to correlate the activity of the real operator and the evolution of his or her avatar in the virtual world.

Each operator repeated the same 11 maintenance tasks on the PMU under realistic conditions—reproducing the real weight and center of gravity. The PMU was composed of wooden parts and the real components of the upper deck. The realistic constraints were reproduced between the mock-up and the maintenance operators: the removable parts (with their real weight and center of gravity), the torque force, and small removable components (screws, nuts) were installed.

Participants and Organization of the Experiment

Six male operators were selected according to the NF EN ISO 15537 (2004) standard "Principles for selecting and using test persons for testing anthropometric aspects of industrial products and designs." We could not include more operators for our experiment due to the constraints related to industrial maintenance planning and the availability of the simulation tools (VR and PMU). Two main characteristics were considered when selecting the subjects: anthropometric parameters (Table 2) and work experience (knowledge and expertise concerning the maintenance of helicopter engine systems). In addition, informed consent was obtained from each participant and the subjects were informed about the objectives and the methodology of the study. During the VR simulation, one operator (out of six subjects) was only able to complete four of the 11 tasks because he experienced motion sickness.

The experiment started on the PMU, with each of the six operators performing the 11 tasks individually over 2 hr. The same protocol was deployed within the VR platform 6 weeks later. In total, 12 hr of experimentation per simulation tool were analyzed based on direct observation

TABLE 2: The Operator's Characteristics and Anthropometric Measurements Applied to Create the Manikins in the Digital Human Modeling

	Age	Experience (years)	Weight (Kg)	BMI (Kg m^2)	Stature (cm)	Trochanteric Height (cm)	Shoulder Width (cm)	Pelvis Width (cm)	Hand Length (cm)	Hand Width (cm)
Operator 1	42	11	69	25.2	165.5	84	40	31.5	17.2	6.6
Operator 2	31	13	70	24.2	170	80	41.2	33.5	18.3	7.4
Operator 3	52	22	87	27.8	177	90	43	36.5	21.6	7.8
Operator 4	45	24	76	23.9	178.5	95	43	33	19.8	7.8
Operator 5	46	11	82	24.5	183	97	44.3	35.9	20.6	9.6
Operator 6	51	30	105	31.0	184	102	48.4	38.7	19.4	8.6
M (*SD*)	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)

TABLE 3: Common HFE Indicators Between DHM, VR, and PMU Related to Maintenance Tasks, and the Measurement Tools Used to Evaluate These Indicators

Indicators	Measurement tools VR and PMU	Measurement tools DHM	Metrics
Posture	Reach envelope (video/photo)	Reach envelope (analysis option)	% (time)
	RULA (Paper version)	RULA (analysis option)	Scale from 1 to 7
Musculoskeletal symptoms	Nordic questionnaire	/	Neck
			Shoulders
			Upper body
			Elbows
			Lumbar
			Wrists/hands
			Hips
			Knees
			Ankles/feet
Effort	Borg (perceived physical exertion)	/	Scale from 0 to 10
Workplace safety	APACT check list (section 9)	APACT check list (section 9)	Scale from 0 to 10
Time	Duration	/	Task duration
Mental workload	NASA-TLX	/	Scale from 0 to 100

Note. HFE = human factors/ergonomics; DHM = digital human modeling; VR = virtual reality; PMU = physical mock-up; RULA = rapid upper limb assessment; APACT = Association for Improvement of Working Conditions; NASA-TLX = National Aeronautics and Space Administration—Task Load Index.

and video recording. To perform the third experiment with DHM, a series of anthropometric parameters were measured on real operators to simulate the digital manikin in a way that reflected the operator. These measurements were carried out based on the NF EN ISO 7250 (2017) standard "Basic human body measurements for technological design." The six main anthropometric parameters were stature, trochanteric height, shoulder width (bideltoid), pelvis width (seated subject), and the length and width of the hand (Table 2). We used the "posture editor" option in CATIA to set the manikin consistent with the anthropometric dimensions of each body segment and to adjust the angulation of each joint (Hashim et al., 2014; Neumann, 2006).

We can divide our analysis into two parts: comparing two simulation tools by considering six HFE indicators with the participation of the real operators (VR and PMU) and comparing three simulation tools (DHM, VR, and PMU) by integrating three HFE indicators. Due to the limitation of DHM, it was not possible to assess all aspects of activity without a real operator. The following section will discuss the common HFE indicators and investigation instruments that were used in this study in detail.

The Investigation Instrument

The operator's activity was analyzed through two frequent maintenance activities that are often studied in maintainability: assembly and disassembly—defined as the capacity for an operator to disassemble and assemble a mechanical system (De Leon, Díaz, Martínez, & Marquez, 2012). We selected six HFE indicators to analyze these activities, which made it possible to cover the majority of HFE dimensions (physical, cognitive, and organizational dimensions) as defined by the International Ergonomics Association (IEA; 2000). The measurement tools used to quantify HFE indicators were as follows (Table 3):

- The reach envelope: we measured the percentage of time it took the operator to reach the maintenance area on VR and PMU. For DHM, the "reach envelope" was analyzed and measured as a percentage of time by estimating the total duration of the task via the MTM method. The DHM proposed an assessment of reach envelope, simulating a virtual envelope around the manikin (Guan, Lei, & Li, 2012; Hashim et al., 2014; Neumann, 2006).
- RULA assesses the upper limbs' exposure to MSD risks. This method takes into account three main indicators: posture, force, and frequency (McAtamney & Corlett, 1993). This tool measured the postures of the subjects with a paper-based checklist on VR and PMU. The posture assessment option is available in CATIA software and allowed us to evaluate the postures of manikins on DHM (Guan et al., 2012; Vyavahare & Kallurkar, 2015).
- The Borg scale (Borg, 1982) was used to measure perceived exertion during physical activity. Its recent version, CR10, ranging from 0 (*no effort*) to 10 (*very hard*), was used only for the experience on VR and PMU.
- Safety work area: A checklist developed by the Association for Improvement of Working Conditions (called the APACT) is used to evaluate the safety criteria of DMU, VR, and PMU settings (Chitescu et al., 2003). This checklist possesses 22 parameters evaluating the HFE of the workplace in terms of ergonomic standards. Section nine of this checklist, which relates to "work area safety," was used to assess the potential risks of indicators including working at height, falls, burns, or breaks, by combining the level of personal protection and the integrity of work protection, thus showing us the organizational dimension of the task. The score is ranked from 0 to 10 and considered damaging below 6.5.
- NASA-TLX (Hart & Staveland, 1988) was used to evaluate mental workload. Based on six dimensions (mental demands, physical demands, time requirement, personal performance, frustration, and stress), it provides a final score rated from 0 to 100 that shows the degree of mental workload (low ≤ 30 or high ≥ 30). The operators answered the NASA-TLX questionnaire immediately after performing the simulated task, but only for the experience on VR and PMU.
- Nordic questionnaire (Kuorinka et al., 1987): MSD symptoms were assessed by a body map questionnaire developed based on the Standardized Nordic questionnaire. This questionnaire was only used for the experiments on VR and PMU.

Statistical Analysis

We used the nonparametric Friedman and Wilcoxon tests because of the small sample size and the dependent variables (same population in three settings). The differences in execution time for performing the 11 maintenance tasks were tested for three variables (the theoretical execution time, the execution time through VR platform, and the PMU setting) using the Friedman test. The common variables (RULA and workplace safety score) for three situations (DHM, VR, and PMU) were also analyzed using the Friedman statistical test. The nonparametric Wilcoxon test was used to compare the indicators for musculoskeletal symptoms, mental workload, and perceived physical exertion on the VR and PMU settings. Statistical analysis was performed in SPSS 24.0 (IBM), and $p < .05$ was considered significant.

RESULTS

Each task performed on both simulation tools (VR and PMU) required an execution time higher than the theoretical time estimated by the MTM method, and this difference was statistically significant for nine tasks (Figure 5). Furthermore, variable execution times were found between VR and PMU. For example, the duration for executing Task 1 was 7.6 ($\pm$0.3) s on the PMU, whereas it was 164.7 ($\pm$12.3) s on the VR platform—much higher than PMU. However, it was opposite for Task 10 as the execution time was 393.2 ($\pm$68.1) s on VR and 168.4 ($\pm$11.3) s on PMU.

We compared the various HFE indicators tested on the simulation tools (VR and PMU) with the participation of real operators. The RULA score and the safety at work score were not significantly different between VR and PMU. The musculoskeletal symptoms in the lower back and knee represented the meaningful percentages felt by the participants. The lower back strain was significantly different between VR and PMU only for Task 8 (Table 4). The percentages of musculoskeletal symptoms were negligible for the other body segments on both

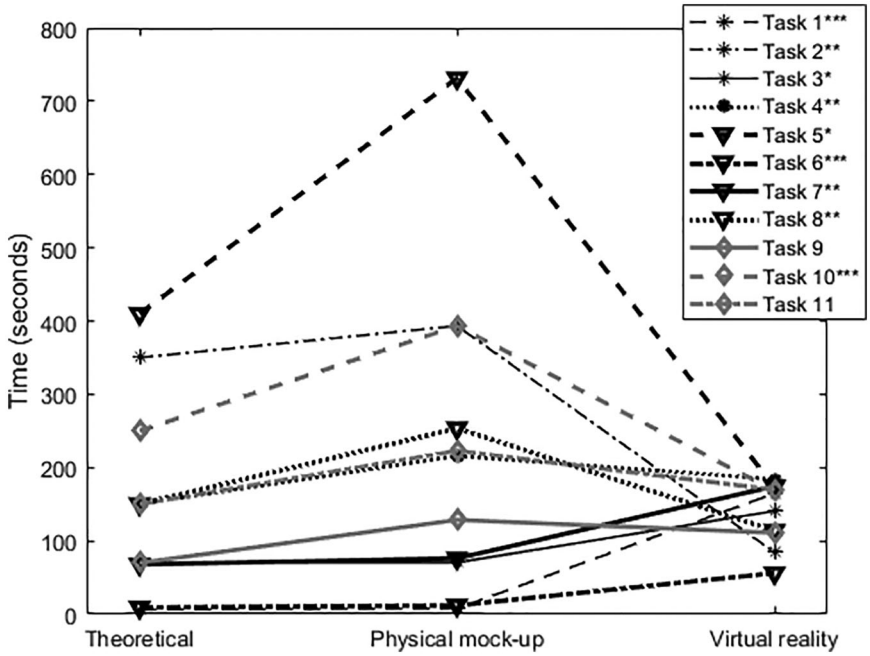


Figure 5. The execution time of 11 aviation maintenance tasks on the physical mock-up (PMU) and virtual reality (VR). The theoretical execution time estimated by the mean time measurement (MTM) method provided for each task (Friedman $*p \leq .05$;$**p \leq .01$; $***p \leq .001$).

simulation tools. Perceived physical exertion (Borg scale) and mental workload (NASA-TLX) were compared in individual tasks with both VR and PMU. The Wilcoxon test showed no significant difference between the results of the Borg scale and NASA-TLX on VR and PMU. However, the NASA-TLX score presented a few differences, and mental workload was higher for VR than for PMU in each task. Tasks 2 and 10 received the highest scores—regardless of simulation tool—due to the excessive time and difficult accessibility associated with a static effort to retain an alternator weighing 18 kg. A long static effort quickly caused pain; the operator was irritated and wanted to accomplish the task as soon as possible, which heightened the mental workload. Tasks 1 (displacement in the engine cowling) and 9 (checking and tightening torque) were the easiest, as 1 required little effort.

Furthermore, the RULA score for each task was compared between DHM, VR, and PMU. Five tasks showed a significant difference in the RULA score between DHM, VR, and PMU (Table 5). Only Task 8 had a similar score between the three simulation tools (Table 5). Five tasks showed significant differences between the three simulation tools for safety at work parameters (Table 5). For these five tasks (2, 3, 5, 6, and 7), we observed similar characteristics with sufficient space to move the manikin in various postures (Figure 6). However, the environment was constrained for the rest of the tasks (2, 5, 7, 8, 9, and 10), and the manikin was placed intuitively.

A significant difference existed for Tasks 3 and 6 for both the RULA score and safety at work score. We found the same safety at work score for 54.5% of the tasks for three simulation tools. The safety at work score for Task 3 was 7 on VR and PMU and higher than 5.4 for DHM, indicating the minor risks at the work situation area. However, the safety at work score was less than 6.5 for the rest of the tasks on three simulation tools—reaching 4 for 24% of tasks (indicating a significant risk for the operators).

TABLE 4: Musculoskeletal Symptoms and Mental Workload (NASA-TLX) for Each Task on the VR and PMU Tools

Ergonomics Parameters	Task	*N*	VR *M* (*SE*)	PMU *M* (*SE*)
Musculoskeletal symptoms Lower back	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)
	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)
Perceived physical exertion (Borg scale)	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)
Mental workload (NASA-TLX)	1	6	34.3 (6.1)	18.2 (5.9)
	2	6	61.3 (7.2)	48.8 (6.5)
	3	5	35.3 (6)	27.6 (3.7)
	4	5	37.6 (4.9)	30.1 (2.7)
	5	5	45.1 (7.1)	41.5 (5.3)
	6	6	32.4 (5.2)	28.1 (5.3)
	7	5	41.1 (5.6)	31.7 (6)
	8	5	43 (6.2)	37.8 (6)
	9	5	43 (4.6)	26.8 (3.9)
	10	6	51 (7.3)	56.1 (8.7)
	11	5	42 (5.5)	36.7 (5.3)

Note. NASA-TLX = National Aeronautics and Space Administration—Task Load Index; VR = virtual reality; PMU = physical mock-up.
Wilcoxon, *$p \leq .05$.

By comparing three simulation tools, it was possible to demonstrate that some maintenance tasks could not be reproduced satisfactorily (Figure 7), particularly for Tasks 3 and 6. These tasks present a significant difference between DHM, VR, and PMU for the indicators of safety at work and the RULA score. Both Tasks 3 and 6 aimed to manipulate an electrical generator and a hydraulic drain. For Task 6, the manipulation of the drain collector is performed from

TABLE 5: Comparison of the Three Simulation Tools Based on RULA Scores and Safety at Work Indicators for Each Task

Ergonomics Parameters	Task	*N*	Digital Human Modeling *M* (*SE*)	Virtual Reality *M* (*SE*)	Physical Mock-Up *M* (*SE*)
RULA	1*	6	3.33 (0.3)	2.5 (0.3)	2.7 (0.3)
	2	6	6.83 (0.2)	7	7
	3**	5	5.83 (1.2)	7	7
	4*	5	6.33 (0.3)	7	7
	5	5	6.83 (0.2)	7	7
	6**	6	5.5 (0.7)	4.17 (0.2)	4.16 (0.1)
	7	5	7	3.9 (0.2)	4
	8	5	7	7	7
	9	5	6 (0.4)	4	4
	10	6	6.17 (1.3)	7	7
	11*	5	6.67 (0.3)	7	7
Safety at work indicator	1	6	4	4	4
	2*	6	5.7 (0.3)	6.5 (0.3)	6.5 (0.3)
	3***	5	5.4 (0.3)	7	7
	4	5	4.8 (0.2)	5	5
	5**	5	5.6 (0.3)	6.4 (1.8)	4.4 (1.8)
	6***	6	4.83 (0.2)	4	4
	7**	5	6	4.4 (0.8)	4.4 (0.8)
	8	5	5	4.4 (0.8)	4.4 (0.8)
	9	5	6	6	6
	10	6	4	4	4
	11	5	6	6	6

Note. RULA = rapid upper limb assessment.
Friedman test: *$p \leq .05$. **$p \leq .01$. ***$p \leq .001$.

the platform, without real environmental constraints (helicopter structure, wire, etc.). Poor accessibility and the resulting awkward posture were the common risk factors for Tasks 3 and 6. The maintenance operators had to work in a kneeling posture and pass their upper body through many electrical wires, hydraulic pipes, and mechanical systems.

Moreover, 11 maintenance tasks were performed in the confined space—without the possibility of prolonged displacement and moving around the helicopter—in the work area (limiting the freedom of motion). This condition reduced the variability of postures and the operational leeway of the maintenance operators. However, the maintainability stakeholders could easily make the best choice for placing DHM in the work environment.

DISCUSSION

This study aims to evaluate the difference in estimating the common HFE indicators between three main simulation tools—DHM and VR in the digital category and PMU in the physical category—through a case study in the helicopter industry. We found that the estimation difference for the majority of HFE indicators was not significant between VR and PMU, except for time execution. However, DHM, VR, and PMU estimated different scores for



Figure 6. The operator performing a maintenance task with similar ergonomic characteristics for digital human modeling, the virtual reality platform, and the physical mock-up.

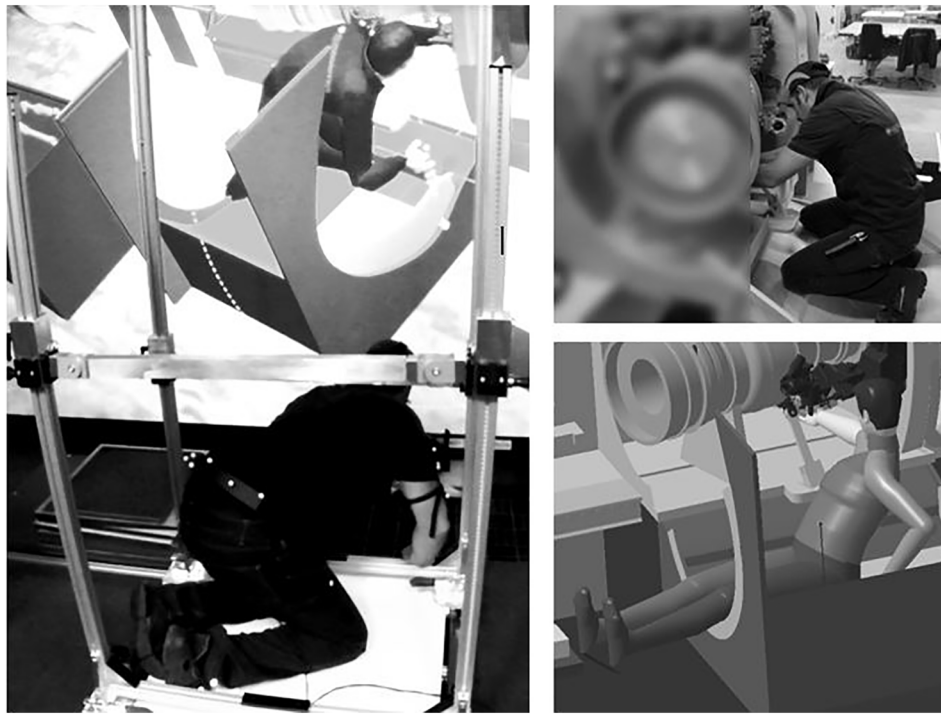


Figure 7. A task with different postures on digital human modeling, virtual reality, and physical mock-up for the same operator.

posture assessment (RULA) and safety indicators for several tasks.

The duration of task execution between the theoretical time estimated by the MTM method and the task execution on VR and PMU was different and the tasks performed on both simulation tools required an execution time that was higher than the theoretical time. Only two tasks did not present a significant difference (Tasks 9 and 11) because they were simple tasks (with a few sequences and without significant effort). Theoretical time was estimated correctly. We found that the execution time for more than half of the tasks was higher on the VR platform

than on the PMU tool. One of the reasons may be related to the perception of the environment, which could lead to operators being distracted. In our study, the spatial perception was not realistic (Loomis & Philbeck, 2008) due to the gap between perception of the real environment (that maintenance operators are already familiar with) and perception in the virtual platform. The volume of the room limits the workspace in the VR platform, and new technologies (such as mixed reality) have to emerge to perceive the workspace well (Burns, Salter, Sugden, & Sutherland, 2018).

Moreover, the perception of the environment could be improved by the quality of the initial CAD transferred to the VR platform and by the graphics displayed inside the helmet that provides the optimized technical features such as a more realistic field of view (Bowman & McMahan, 2007). Some maintenance tasks (Tasks 1, 3, 6, and 7) required a large workspace in the VR room to ensure the same movement in the workspace volume perceived on the digital immersion. As the physical space of the VR platform limited the movement/displacement of the operators, they had to think and choose a strategy to reach the final destination in the digital immersion and to compensate for this difference.

On the contrary, several tasks required a higher execution time on PMU due to the limitation of physical contacts and the lack of representation of all the physical elements on the VR platform. For example, the torquing bolt was a frequent task in maintenance, but, we could not reproduce this forceful task in VR platforms. Lawson, Salanitri, and Waterfield (2016) have already detailed these specific requirements of VR. The development and integration of physical parts into the VR platform may improve the efficiency of simulation and reduce the gap between real and digital simulation. Therefore, we inserted into the VR platform the physical parts (hatch, table, or wall) to represent the primary physical contacts and mobile parts with a tracker (real torque wrench and an alternator) to reproduce force, similar to previous studies (Menezes, Gouveia, & Patrão, 2018). Several studies proposed the haptic system to improve the quality of VR platform in aeronautic (Savall, Borro, Gil, & Matey, 2002), medical (Wang et al., 2017), and automotive industries (Langley et al., 2016). However, this technology is costly, which justifies exploiting the current potential of tracking technology (Meier & Holzer, 2015; Riley, 2016). Using real parts with trackers is cheaper than the haptic system and provides a more realistic HFE assessment.

Furthermore, although the participants in our study were trained and immersed in the VR platform 1 week before the experiment, they were unsettled at the beginning of the experiment, needed a few minutes to find their bearings, and adapted to a virtual environment by considering their knowledge of the real world. Motion sickness, especially during a long virtual simulation, also appeared to be a considerable issue (Chen et al., 2017). A long break between the tasks was required in the VR platform to enable the operator to continue the experiment under safe conditions. Therefore, the sequence may not be sufficiently realistic because, in reality, an operator does not take a break between each task.

Our findings suggest that managing the perception of the environment and physical contact were primary influences on the work sequences and the organizational aspect. Indeed, the realism of contacts and forces with real parts and maintenance tools tracked on the VR platform superimposed virtual and real contact, reproducing the force and posture perception (Seth, Vance, & Oliver, 2011). Therefore, the assessment of the other HFE indicators (posture, force, safety parameters, mental workload, and MSD symptoms) was not significantly different between VR and PMU in this study. Pontonnier et al. (2014) reported a difference between VR and PMU to assess HFE indicators when the physical contact and force are not present on VR.

The study of the reach envelope between DHM, VR, and PMU did not present any significant difference as it systematically gave an optimal score of 100% for 11 tasks and six operators. Five tasks showed a significant difference for the RULA score and safety indicators between DHM compared with VR and PMU. These tasks concerned specific work situations where the operators must typically be in contact with the environment; however, when these situations were developed on DHM, the engineers did not have sufficient technical information

about all the potential contacts between the various parts of an architecture. For example, the engineer put in contact the manikin on DHM with the firewall in Task 4, but this contact is forbidden because the firewall could be broken. Therefore, the posture for Task 4 is more comfortable in DHM than in VR and PMU, which resulted in the lowest posture score on DHM. The lack of communication on technical information between different design office departments and maintainability engineers performing the analysis may be the reason for the differences observed for safety indicators between the tasks in DHM and VR/PMU. For example, we observed the same behavior, posture, and contact with the environment in all three simulation tools (Figure 6) for Task 2 (disassembly/assembly of an alternator weighing 18 kg). The main reason for this similarity, especially on the DHM, might be related to the confined space, in which the maintainability stakeholders had only one choice to place the manikin. However, there were two safety risks that the DHM analysis did not report—cutting the edge of the firewall and slipping due to oil leakage on the floor (explaining the lower safety score on DHM).

The DHM lacked detail in the digital environment, and it may mislead the maintainability stakeholder when performing the simulation. This difficulty might be due to using DHM in the very preliminary stage of the design process, where the definition of the work situation is not optimal, and the information transmitted to the maintainability engineer will change every day because of the iterative process (Pistikopoulos, Vassiliadis, & Papageorgiou, 2000). The maintainability engineer performs the HFE analysis when the architectural structure of the product is not yet frozen on one or several complex tasks in DHM, independently of the other tasks in a work area, meaning that the study excludes other maintenance tasks in this area (Bernard, Zare, Sagot, & Paquin, 2018; De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014). The architectural structure would probably change throughout the design process, while DHM would not be repeated or would only be repeated for a specific task due to various constraints such as time limitation and the limitations of other departments. By changing this paradigm and studying a zone by DHM instead of the specific complex tasks, we can include several tasks very early in an area, and the efficiency of modification on the new architecture would improve. This paradigm of performing the HFE analysis on a specific task is the same for VR and PMU. This approach may be effective with VR and PMU because these simulation tools are used later in the design process, when the technical information is more stable and complete. However, we propose changing this paradigm for the DHM study and performing the HFE analysis according to the work area. The HFE indicators may be assessed in DHM according to the work area by selecting and simulating various maintenance tasks (the most complex one that affects the operator's activity). This approach may make it easier to gain an overview of the central issues in the interaction between the digital manikins and the environment.

One of the limitations of this study is the small sample size of maintenance operators, which was due to the industrial constraints. Furthermore, one of the participants could not finish all of the experiments, and we had to exclude him from our study. It may be useful to test these simulation tools and other new technologies (augmented reality and mixed reality) with a large population and in several work areas. The results of this experiment should be generalized only with caution, as working on the other parts of the helicopter (such as the tail rotor, inside the cabin, or the cockpit) may provide different results for each simulation tool. The operator's perception may be different when completing the maintenance task in a real situation (typically in the cabin within a confined space) compared with the situation in our experiment where the tasks were performed at heights of three meters on the upper deck (engine).

Our findings open up a debate on the application of the simulation tools that significantly influences the integration of HFE into the design process, not only the maintainability department but also all departments that are connected by a single project. Therefore, we propose developing a tool in a further study explicitly aimed at those who are not experts in HFE to use simulation tools (DMU and PMU) in an efficient manner during design development.

CONCLUSION

Through this industrial experiment on the maintenance activity of a helicopter manufacturer, we confirmed potential interest related to using the digital simulation tool through the VR platform by inserting physical parts to simulate real contacts and forces with the participation of the real operators. We found similar results for biomechanical indicators (such as posture and force) and mental workload in VR and PMU. To improve the assessment of the duration of time execution, we propose improving operator training in VR and better anticipating the physical side added in the VR room. In addition, the DHM produces a significant difference for various maintenance tasks that highlights the need for developing a new paradigm: during a maintainability analysis, do not perform an HFE analysis by individual task, but instead by area, including various maintenance tasks.

ACKNOWLEDGMENTS

I express my deepest and sincere gratitude to all the operators who participated in this experimentation: Jean-Michel, Franck F., Franck R., Charly, Eric, Philippe, and Thierry.

This research was funded through PhD studies between University of Bourgogne Franche-Comté (France) and a French helicopters manufacturer. Funding information: Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, Grant/Award Number: N°2015/1306; French National Association of Research and Technology. This paper is based on an earlier presentation at the International Ergonomics Association conference (IEA 2018).

KEY POINTS

- VR simulation must be better anticipated to enhance the integration of real physical parts in the VR room;
- In VR and PMU, we found similar results for biomechanical indicators (such as posture and force) and mental workload;
- Change the paradigm of using DHM: Do not perform an HFE analysis for individual tasks, but instead by area, including various maintenance tasks.
- Simulation tools (physical and digital), common between ergonomists and engineers, can be better used to assess ergonomics, especially if the right practices are specified and made known to all actors in the design office.

ORCID iD

Fabien Bernard https://orcid.org/0000-0003-1420-674X

REFERENCES

Ahmed, S., Gawand, M. S., Irshad, L., & Demirel, H. O. (2018, August 26–29). *Exploring the design space using a surrogate model approach with digital human modeling simulations*. Paper presented at the ASME 2018 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (paper no. V01BT02A011), Quebec City, Quebec, Canada.

Amundarain, A., Borro, D., Matey, L., Alonso, A. G., & de Guipúzcoa, T. (2003, November 5–7). *Occlusion culling for the visualization of aeronautical engines digital mock-ups*. Paper presented at the proceedings of Virtual Concept, Biarritz.

Aromaa, S., & Väänänen, K. (2016). Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design. *Applied Ergonomics*, *56*, 11–18.

Association française des ingénieurs et responsables de maintenance. (2004). *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* [French Association of Maintenance Engineers- Health and safety at work: National maintenance guide]. Paris, France: Author.

Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., & Sagot, J. C. (2017, January 23–26). *Consideration of human factors in aeronautical maintainability*. Paper presented at the Annual Reliability and Maintainability Symposium, Orlando, FL.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2018). Virtual reality simulation and ergonomics assessment in aviation maintainability. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Eds.), *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 141–154). Cham, Switzerland: Springer.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2019). Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *29*, 350–360.

Bittencourt, J. M., Duarte, F., & Béguin, P. (2017). From the past to the future: Integrating work experience into the design process. *Work*, *57*, 379–387.

Borg, G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, *14*, 377–381.

Bowman, D. A., & McMahan, R. P. (2007). Virtual reality: How much immersion is enough? *Computer*, *40*(7), 36–43.

Boy, G. A. (2018). From rigid to flexible–from virtual to tangible an evolution of human-centered design. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Eds.), *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 54–63). Cham, Switzerland: Springer.

Broberg, O. (2007). Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *17*, 353–366.

Burns, A., Salter, T., Sugden, B., & Sutherland, J. (2018). Virtual reality environment with real world objects. US9865089B2 Patent.

Chang, Y.-H., & Wang, Y.-C. (2010). Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians. *Safety Science*, *48*, 54–62.

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*, 903–910.

Chitescu, C., Sagot, J. C., & Gomes, S. (2003, July). Favoriser l'articulation "Ergonomie/conception de produits" à l'aide de mannequins numériques ["Ergonomics/product design" using digital mannequins]. Dans *actes de la conférence 10eme Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception, Belfort, France*.

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.

Czerniak, J. N., Brandl, C., & Mertens, A. (2017). Designing human-machine interaction concepts for machine tool controls regarding ergonomic requirements. *IFAC-PapersOnline*, *50*(1), 1378–1383.

Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach. *Applied Ergonomics*, *27*, 157–163.

De Leon, P. M., Díaz, V. G. P., Martínez, L. B., & Marquez, A. C. (2012). A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes. *Reliability Engineering & System Safety*, *100*, 84–92.

De Sa, A. G., & Zachmann, G. (1999). Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes. *Computers & Graphics*, *23*, 389–403.

Di Gironimo, G., Monacelli, G., & Patalano, S. (2004, April). *A design methodology for maintainability of automotive components in virtual environment*. Paper presented at the DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia.

Dmitriev, S., Burlakov, V., Popov, O., & Popov, D. (2015). Technological processes and quality control in aircraft engine maintenance. *Aviation*, *19*(3), 133–137.

Duffy, V. G. (2016). *Handbook of digital human modeling: Research for applied ergonomics and human factors engineering*. Boca Raton, FL: CRC Press.

EN 13306:2010. (2010). Maintenance-maintenance terminology.

European Agency for Safety and Health at Work. (2010). *Safe maintenance in practice*. Luxembourg: Publications Offices of the European Union.

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*, 937–949.

Gruber, M., De Leon, N., George, G., & Thompson, P. (2015). Managing by design. *Academy of Management Journal*, *58*(1), 1–7.

Guan, T. M., Lei, L., & Li, J. B. (2012, June). The human engineering analysis of the racing wheelchair. *Advanced Materials Research*, *538*, 2802–2806.

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.

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. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *3*, 233–239.

Hobbs, A. N. (2000). Maintenance "error," lessons from the BASI survey. *Flight Safety Australia*, *4*, 36–37.

Horeman, T., Akhtar, K., & Tuijthof, G. J. (2015). Physical simulators. In M. Karahan, G. M. M. J. Kerkhoffs, P. Randelli, & G. Tuijthof (Eds.), *Effective training of arthroscopic skills* (pp. 57–69). Berlin, Germany: Springer.

International Ergonomics Association. (2000). *"What is ergonomics," "IEA members" and "study programs."* Retrieved from http://www.iea.cc/index.php

ISO 15537. (2004). Principles for selecting and using test persons for testing anthropometric aspects of industrial products and designs.

ISO 7250. (2017). Basic human body measurements for technological design.

Johnson, T. L., & Fletcher, S. R. (2015). The limitations of using only CAD and DHM in design relating to high value manufacturing. In *Contemporary Ergonomics and Human Factors 2015: Proceedings of the International Conference on Ergonomics & Human Factors* (pp. 329–332). London, England: Taylor & Francis.

Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, *64*, 9–12.

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*, 233–237.

Lämkull, D., Hanson, L., & Örtengren, R. (2009). A comparative study of digital human modelling simulation results and their outcomes in reality: A case study within manual assembly of automobiles. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *39*, 428–441.

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*, 667–679.

Laring, J., Forsman, M., Kadefors, R., & Örtengren, R. (2002). MTM-based ergonomic workload analysis. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *30*, 135–148.

Lawson, G., Salanitri, D., & Waterfield, B. (2016). Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer. *Applied Ergonomics*, *53*, 323–330.

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*, 296–303.

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* (pp. 17–60). Pittsburgh, PA: Psychology Press.

Lu, Z., Zhou, J., & Li, N. (2015). Maintainability fuzzy evaluation based on maintenance task virtual simulation for aircraft system. *Eksploatacja i Niezawodność*, *17*(4), 504–512.

Maurino, D. E., Reason, J., Johnston, N., & Lee, R. B. (2017). *Beyond aviation human factors: Safety in high technology systems*. New York, NY: Routledge.

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.

Meier, P., & Holzer, S. (2015). Method and device for illustrating a virtual object in a real environment. US9165405B2 Patent.

Meister, D. (2014). *Human factors testing and evaluation* (Vol. 5). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.

Menezes, P., Gouveia, N., & Patrão, B. (2018). Touching is believing-adding real objects to virtual reality. In M. Auer

& D. Zutin (Eds.), *Online Engineering & Internet of Things* (pp. 681–688). Cham, Switzerland: Springer.

Neumann, P. (2006). *Inventory of tools for ergonomic evaluation*. Stockholm, Sweden: Arbetslivsinstitutet, förlagstjänst.

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), 9–13.

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*, 298–306.

Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., & Papageorgiou, L. G. (2000). Process design for maintainability: An optimization approach. *Computers & Chemical Engineering*, *24*, 203–208. doi:10.1016/S0098-1354(00)00514-7

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*, 199–208.

Quintero-Duran, M., & Paul, G. (2016, June 15–17). Ergonomic assessment of a physical task using two different DHM systems. Paper presented at the 4th International Digital Human Modeling Symposium (DHM2016), Montreal, Quebec, Canada.

Rasmussen, J., Damsgaard, M., Christensen, S. T., & Surma, E. (2002). Design optimization with respect to ergonomic properties. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, *24*, 89–97. doi:10.1007/s00158-002-0219-x

Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, *11*(1), 10–19.

Riley, S. (2016). System and method of providing access to virtual spaces that are associated with physical analogues in the real world. US9403087 Patent.

Sagot, J. C. (1999). *Ergonomie et conception anthropocentrée* (Document pour l'Habilitation à diriger des recherches). Nancy, France: Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL).

Savall, J., Borro, D., Gil, J. J., & Matey, L. (2002). Description of a haptic system for virtual maintainability in aeronautics. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002 (Vol. 3 pp. 2887–2892). New York, NY: IEEE.

Seth, A., Vance, J. M., & Oliver, J. H. (2011). Virtual reality for assembly methods prototyping: A review. *Virtual Reality*, *15*(1), 5–20.

Sharma, H. K., Singhal, P., & Sonia, P. (2018). Computer-assisted industrial ergonomics: A review. In P. K. Ray & J. Maiti (Eds.), *Ergonomic design of products and worksystems-21st century perspectives of Asia* (pp. 37–48). Singapore: Springer.

Shi, Y., & Liu, Y. (2012). Application of DELMIA on maintainability design of aircraft. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling* (pp. 771–774). Paris, France: Atlantis Press.

Spenser, J. (2008). *The airplane*. New York, NY: Collins.

Stoffregen, T., Bardy, B. G., Smart, L., & Pagulayan, R. (2003). Virtual and adaptive environments: Applications, implications, and human performance issues. In L. J. Hettinger & M. W. Haas (Eds.), *On the nature and evaluation of fidelity in virtual environments* (pp. 111–128). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Vyavahare, R. T., & Kallurkar, S. P. (2015, December). Ergonomic evaluation of electric hedge trimmer using digital human modeling. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *17*(4), 100–108.

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 *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 215–216). New York, NY: IEEE.

Wiener, E. L., & Nagel, D. C. (Eds.). (1988). *Human factors in aviation*. Houston, TX: Gulf Professional Publishing.

Fabien Bernard worked 2 years as a research engineer at UTBM in the University of Bourgogne Franche-Comté before starting his PhD studies in the maintainability department of Airbus Helicopters France. He teaches in the Department of Ergonomics, Design, and Mechanical Engineering (EDIM at UTBM) and in the Aix-Marseille University (AMU).

Jean-Claude Sagot is the head of the research team of Ergonomics and System Design (ERCOS) at UTBM in the University of Bourgogne Franche-Comté. He teaches in the Department of Ergonomics, Design, and Mechanical Engineering (EDIM).

Mohsen Zare is an associate professor at the University of Bourgogne Franche-Comté, more precisely, at UTBM on the ERCOS team. He teaches in the Department of Ergonomics, Design, and Mechanical Engineering (EDIM).

Raphael Paquin is maintainability team leader at Airbus Helicopters, and has been working in this department since 2006. He uses Virtual Reality in Design Office to assess and improve maintainability on new aircraft during development phases. He teaches at the Aix-Marseille University (AMU).

Date received: November 19, 2018
Date accepted: June 12, 2019

Received: 25 September 2018 | Revised: 17 December 2018 | Accepted: 10 January 2019

DOI: 10.1002/hfm.20792

RESEARCH ARTICLES

WILEY

Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability

Fabien Bernard[1,2] | Mohsen Zare[2] | Jean-Claude Sagot[2] | Raphael Paquin[1]

[1]Airbus, Marignane, France

[2]ERCOS Group (Pôle), Laboratory of ELLIADD-EA4661, University of Technology of Belfort-Montbéliard (UTBM), University of Bourgogne Franche-Comté, Belfort, France

Correspondence
Fabien Bernard, ERCOS Group (Pôle), Laboratory of ELLIADD-EA4661, University of Technology of Belfort-Montbéliard (UTBM), University of Bourgogne Franche-Comté, 90010 Belfort Cedex, France.
Email: Fabien.bernard@utbm.fr; Fabien.bernard@airbus.com

Funding information
Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, Grant/Award Number: N°2015/1306; French National Association of Research and Technology

Abstract

The integration of human factors and ergonomics (HFE) in maintenance activities may improve the working conditions of maintenance operators by reducing errors and accidents. Maintainability takes into account HFE in the aeronautics industry to anticipate the design of the aircrafts, following the CPA regulation FAR/CS-25.1309, for large transport category. For the helicopter field, there are no official recommendations but the rotorcraft industry tries to integrate HFE into its design phases of maintainability to increase flight safety. Without a standard framework, the aviation industries (plane and helicopter) develop their own way of working and requirements. Furthermore, previous studies highlight the lack of compromise between the design and HFE criteria in maintainability. The purpose of this paper is, therefore, to investigate how HFE is integrated within all steps of the design process in the maintainability department of helicopter manufacturers in France. The ergonomic skills and knowledge of stakeholders were studied and the associated tools to evaluate the HFE criteria were surveyed. We observed that maintainability stakeholders underutilize powerful simulation tools, which are sufficient for and efficient at performing HFE analysis. Additionally, it was reported that understanding of HFE information weakened over the course of the milestones of the design project progressed. Our conclusion details the need to provide a simple methodology or rather a relevant tool that helps maintainability stakeholders to integrate HFE in a homogenous way along all the design project milestones.

KEYWORDS
aviation, ergonomics, human factors, integration design process, maintainability, maintenance

1 | INTRODUCTION

The aeronautics and helicopter industry encounters technical and technological challenges in the design and production stages, including issues of safety, quality, maintainability, and maintenance (European Aviation Safety Authority, 2011; FAA, 2012). These industries have recently focused on maintainability and maintenance because of costs. Maintenance costs are estimated to amount to 12–15% of the total annual airline expenses for an aircraft operator (Čokorilo, 2011) and 25% of total airline expenses for a helicopter operator (Land & Weitzman, 1995). The French Association of Maintenance Engineers (AFIM, 2004) surveyed 2,500 maintenance operators from various sectors (including aeronautics) in which 62% of respondents considered their occupation to be dangerous. Another study carried out in European countries showed that 15–20% of work accidents and 10–15% of fatal accidents concerned the field of maintenance (European Agency for Safety and Health at Work, 2010). Thus, the field of maintainability is a potential way to improve health and safety conditions during maintenance activities and plays a significant role throughout the design stages.

Maintenance activities are long and complex (Chang & Wang, 2010) and can cause health problems (musculoskeletal disorders, stress, and high mental workload) and workplace accidents (AFIM, 2004; European

 © 2019 Wiley Periodicals, Inc.

Agency for Safety and Health at Work, 2010). Integration of human factors and ergonomics (HFE) in the design process of the maintainability department of the aeronautics industry may reduce these challenges (Hobbs, 2000). Taking HFE into consideration in the design process and anticipating the probable risk factors for the maintenance tasks may increase the well-being of maintenance operators (Antonovsky, Pollock, & Straker, 2014; Chang & Wang, 2010; Reason & Hobbs, 2017; Shanmugam & Paul Robert, 2015). Regazzoni and Rizzi (2014) simulated the assembly and maintenance processes in the early stage of design and performed a virtual evaluation of visibility, reachability, postures, stress, and fatigue using a digital human model. Lu, Zhou and Li, (2015) evaluated the maintainability factors, such as accessibility (visual and reachable) and awkward postures, in the early design stage of a civil aircraft by simulating the maintenance tasks in the digital human model. Shanmugam and Paul Robert (2015) concluded in a literature review that human factor principles had been extensively considered with regard to design aircraft maintenance tasks and equipment. However, this literature review was unable to determine the effective implementation of human factors in the early stage of maintainability design.

The majority of previous studies have focused on proposing new methods and tools for maintainability evaluation. Furthermore, it is primarily the physical aspects of HFE that are highlighted and other HFE characteristics such as cognitive, social, and organizational factors have rarely been reviewed (Chen et al., 2017; Shanmugam & Paul Robert, 2015; Sheikhalishahi, Pintelon, & Azadeh, 2016). Very few studies have investigated how HFE procedures, methods, and tools are implemented in the maintainability design (Bernard, Bazzaro, Paquin, & Sagot, 2017; Broberg, 2007). Knowledge of HFE among maintainability stakeholders and the way that they use different ergonomic tools are less widely considered. This study aims to investigate whether there is a difference between ergonomics criteria (physical, cognitive, and organizational) for maintainability design evaluation and the tools used to quantify these criteria by maintainability stakeholders. Furthermore, we investigated how HFE principles and related tools, such as simulations tools, have been integrated into different phases of the design process for aviation maintainability. A semistructured interview was used to explore stakeholders' knowledge of HFE and HFE's level of integration in the maintainability department.

2 | CONTEXT OF THE STUDY

2.1 | Maintainability: A way of improving aeronautics maintenance

European standard EN 13306:2010 (European Standard, 2010) defines maintainability as the "ability of an item under given conditions of use, to be retained in, or restored to, a state in which it can perform a required function, when maintenance is performed under given conditions and using stated procedures and resources." Maintainability is, therefore, a part of the design office whereas maintenance is performed by operators. This standard also specifies that stakeholders can quantify maintainability through appropriate indicators and measures. A maintainability stakeholder uses indicators as guidelines to carry out objective and quantitative maintainability studies (Berrah, 2002; De Leon, Díaz, Martínez, & Marquez, 2012). Thirty-four indicators are used to assess maintainability and are divided into three categories: technical, economic, and organizational indicators (De Leon et al., 2012). For example, physical or visual accessibility is classed in the technical category, maintenance costs are classed in the economic category, and the level of training is classed in the organizational category (De Leon et al., 2012). Maintainability stakeholders extract primarily technical HFE information from these indicators and provide recommendations to improve designs. Mainly, the HFE design decisions that might influence the architecture of the helicopter, the maintenance tools, and the procedures helping maintenance operators to perform the maintenance tasks correctly (Lee, Ma, Thimm, & Verstraeten, 2008). The following paragraph presents the maintainability indicators that contribute to HFE improvements.

2.2 | Human factors: A key element for maintainability improvement

Integrating HFE characteristics into the design process of maintainability seems to be a solution to better designs for future users (Falzon, 2004; Norros, 2014). The study of physical, cognitive, and organizational dimensions of ergonomics—as defined by the International Association of Ergonomics (IEA, 2000)—revealed the main risk factors in maintenance activities. These risk factors related to poor design are physically arduous and induce a high physical and cognitive workload associated with a complex and unpredictable organization. The literature reveals more focus on the development of maintenance organization processes (such as the general organization of maintenance and preventive/curative maintenance by integrating the indicators to assess costs or availability) than on HFE improvement in aeronautics maintenance activities (Van Horenbeek & Pintelon, 2014; Zwingelstein, 1996). HFE indicators mostly continued to be an example in the technical documentation of maintainability instead of providing objective definitions and indicators to integrate/consider HFE in maintainability and to facilitate maintenance tasks (Garrigou, Thibault, Jackson, & Mascia, 2001).

Figure 1 details the current approach for applying HFE at the design process stage of the maintainability department of the aeronautics industry under investigation—based on the following literatures. The feedback from customers (maintenance operators) is received at the first step of product lifecycle management (PLM; Lee et al., 2008) in the design process (point [1] in Figure 1). PLM includes the product lifecycle and the various milestones with the mandatory requirements. HFE principles are mentioned in the requirements of each milestone, but only a few details are explained, specifically referencing use of the associated methods and tools. During PLM, the development phase corresponds to the design process and includes milestones such as definition, design, prototype, manufacturing, and analysis (Stark, 2015). The third part of this diagram details the interaction between the maintainability department and other

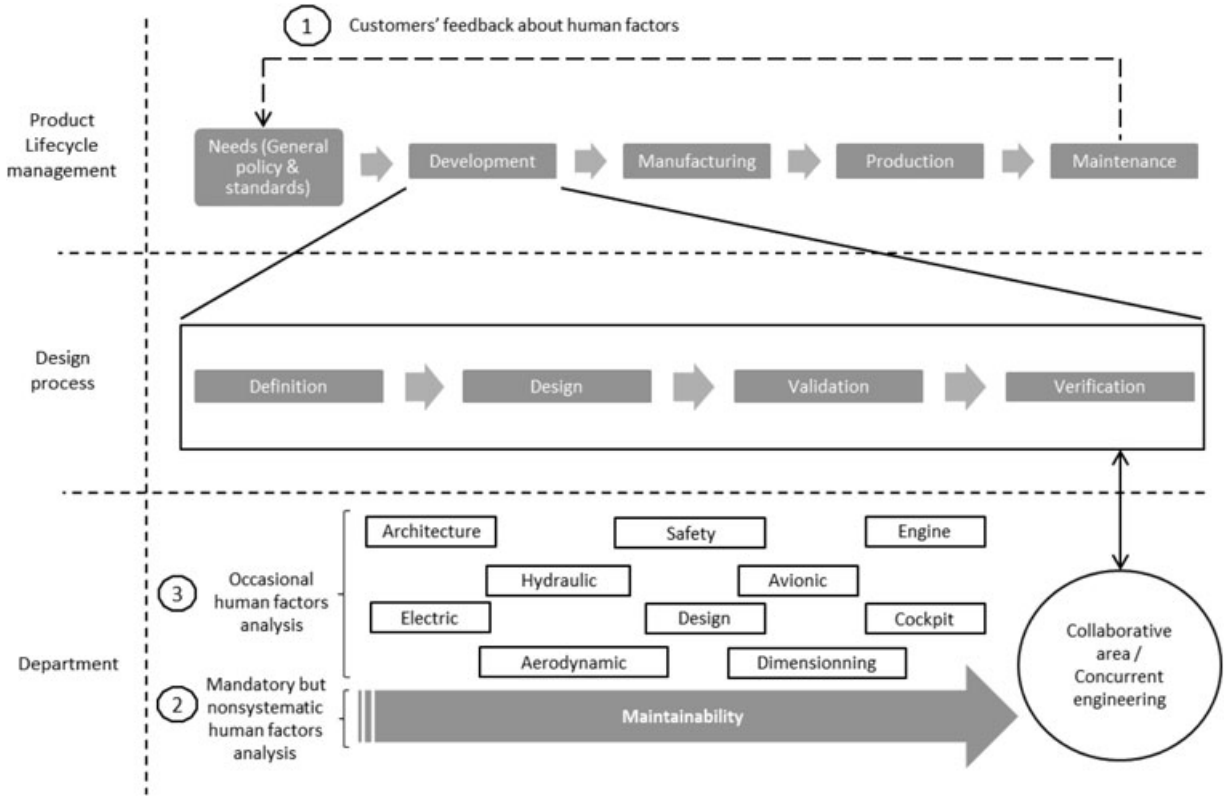


FIGURE 1 Three main ways to integrate human factors and ergonomics (HFE) within the design process in maintainability: (1) from customers' feedback; (2) from mandatory but nonsystematic human factors analysis in the maintainability department; (3) from occasional human factor analysis in the other departments

services, such as architecture, hydraulics, and aerodynamics, with regard to HFE throughout the design process. Through these processes, maintainability designs are studied to integrate the maintenance concept into the design process (Pistikopoulos, Vassiliadis, & Papageorgiou, 2000). Previous studies have proposed common methods for integrating maintainability throughout the design process (Blanchard, 2014). These methods evaluate maintenance indicators such as assembly, disassembly, and tribology (De Leon et al., 2012), whereas there are remarkably few indicators for assessing HFE such as accessibility or visual fields (Di Gironimo, Monacelli, & Patalano, 2004; Regazzoni & Rizzi, 2014; Shi & Liu, 2012). Although several services (e.g., hydraulics and architecture) try to integrate HFE into the design process, this approach is neither systematic nor focused on maintainability (point [3] in Figure 1). Sagot, Gouin, and Gomes (2003) showed in a compendium on this study that HFE had rarely been integrated into the design process of the various industries. They suggested the methodology of collaborative work, using digital human modeling (DHM), computer-aided design (CAD), and virtual reality (VR), to take HFE into account throughout a design process (Germani, Mengoni, & Peruzzini, 2012; Mahdjoub, Al Khatib, Bluntzer, & Sagot, 2013; Sagot et al., 2003). Collaborative work is efficient in codesign situations, providing a heuristic framework if the design stakeholders can articulate individual and collective objectives (Baker, Détienne, & Burkhardt, 2013). However, not all departments that collaborate with the maintainability department (point [2] in Figure 1) systematically apply the collaborative work concerning HFE principles. Furthermore, these departments may carry out HFE analysis, but they do not necessarily communicate with the maintainability service.

Maintainability stakeholders expect to integrate HFE into the design process to explore HFE aspects (physical, organizational, and cognitive factors) of aircraft maintenance (Bernard et al., 2017; Geng, Zhou, Lv, & Wang, 2013; Zhou, Chen, Lv, & Cao, 2016). These stakeholders apply primarily engineering tools, based on their experience—not those tools dedicated to HFE analysis. Several studies have proposed virtual ergonomic tools (DHM and VR) to analyze HFE. For example, DHM used to integrate HFE indicators (disassembly, accessibility, and usability) on maintenance tasks in automotive industries (Di Gironimo et al., 2004) or refrigeration plants (Regazzoni & Rizzi, 2014). In the aviation field, DHM are frequently used to consider the anthropometric parameters, visual fields, postures, and biomechanical single action analysis for maintainability studies (Hashim, Kamat, Halim, & Othman, 2014; Nishanth, Muthukumar, & Arivanantham, 2015). Virtual Reality is also more and more used to assess the operator's accessibility and the interactions with the architecture, particularly in maintainability (Amundarain, Borro, Matey, Alonso, & de Guipúzcoa, 2003; Shi & Liu, 2012). Our previous study showed that maintainability stakeholders preferred to explore the potential of risk exposure through simulation tools (CAD, DHM, virtual reality, and physical mock-up),

but this process was not systematic and well documented for them (Bernard et al., 2017).

Maintenance activities have to be anticipated throughout the product lifecycle because a failure can occur at any time on each part of the system through the lifecycle of the helicopter. This approach requires design and product development methodologies that includes design for X (DFX)—X: Corresponding to the technical characteristics of each specific department (hydraulics, architecture, engine, etc.) impacted by a project. This kind of approach would ensure work collaboration and the integration of the requirements related to the rationalization of the product regarding ergonomics, quality, cost, and time (Huang & Mak, 1997). The approach and the example of a real aviation industry (Figure 1) highlight the importance of integrating HFE in the design process to study maintenance tasks. However, it also requires the systematic integration of HFE requirements in maintainability studies, particularly along the design process. We hypothesize that there is an absence of a predefined and formalized method for maintainability stakeholders to integrate HFE within the design process even if they use various simulation tools. It was also assumed that the maintainability stakeholders had enough education and competence in using simulation tools.

3 | METHODS

3.1 | Research setting and participants

The research setting for this study was the maintainability department of the design office (including all other departments, such as architecture, hydraulics, aerodynamics, dimensioning, and cockpit) in a helicopter industry. The maintainability department investigated the operation of maintenance and developed specific helicopter architecture (for improving the maintenance activity), maintenance tools, and processes dedicated to the maintenance operators. Fifteen maintainability employees, including four technicians and 11 engineers (specialized in mechanical, maintenance, and aviation engineering) participated in a semidirective survey. The technicians and engineers in maintainability had similar skills and working methods to perform HFE analysis. They represent 83% of the entire workforce of the maintainability department. The mean age and the length of work experience were 28.8 (±2.7) years and 6.3 (±2.2) years, respectively

3.2 | Data collection

The ergonomist handed round a survey, formatted as multiple-choice tests, to the engineers and technicians of the maintainability department over 3 weeks. The ergonomist was only present to get the remarks of the subjects and help them to understand the questions and fill it out correctly. The semistructured survey was conducted using 15 questions and a flowchart (Figure 2), with each one lasting 45 min. These questions were created based on previous literature on survey designing (Bradburn, Sudman, & Wansink, 2004). An expert in HFE (ergonomist coming from in-board design department), a questionnaire design specialist, and a maintainability design expert reviewed and revised the questionnaire and flowchart. These experts evaluated the face validity, content validity, and construct validity to ensure comprehensibility and clarity (Singh, 2017).

The data collected using the semistructured survey consisted of three parts:

- The first part focused on demographic information such as age, occupation, training/background, and expertise over eight questions. This part made it possible to map the HFE knowledge and experience of each subject.
- The second part assessed the level of HFE knowledge and the way that this knowledge had been applied in the design process by HFE criteria and tools. Five questions in this part focused on two indicators: Ergonomic criteria used for maintainability analysis and ergonomic assessment tools used to evaluate those criteria (Table 1). We reviewed various studies and listed the potential HFE criteria (Mali & Vyavahare, 2015; Neumann, 2006; Rajesh & Srinath, 2016). Then, the HFE and maintainability experts discussed the relevancy of these indicators based on the practice of maintainability. The irrelevant indicators were excluded from the list, and the remaining criteria were classified into six categories (Table 1). These categories group different aspects of HFE including physical, cognitive, and organizational factors. In the

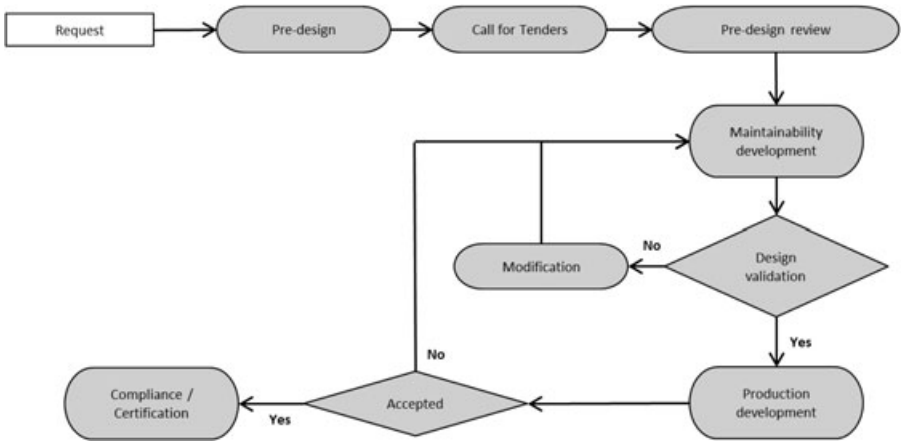


FIGURE 2 The design process of the maintainability department

TABLE 1 Category of ergonomic criteria and related tools

Categories of criteria and tools	Number of criteria	Number of related tools	References
Environmental ergonomics	5	7	Parsons (2000)
Physical activity of the operators	3	11	Li and Buckle (1999)
Work activity organization	8	5	Andersen et al. (2002); Cafakelli, Cain, and Stevens (1977); Kausalya and Srinivasan (2012); Nishanth et al. (2015)
Sensorial and cognitive activity of the operators	5	7	Carayon and Smith (2000); Hart and Staveland (1988); Karasek (1979); Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
Occupational safety and health	2	2	Kausalya and Srinivasan (2012); Salvendy (2012)
Characteristics of operators	2	3	Nishanth et al. (2015); Salvendy (2012)

same way, we extracted 35 tools commonly used in the HFE literature to evaluate the identified criteria. These tools were classified into each of the six categories defined (Table 2). Two tools are repeated between categories: Direct observation with standard evaluation checklist and direct observation with self-developed evaluation checklist. We distinguished between the standard checklist such as the RULA RULA (Rapid Upper Limb Assessment) assessment (McAtamney & Nigel Corlett, 1993), NIOSH equation (Waters, Putz-Anderson, & Garg, 1994), and the self-developed checklist designed by maintainability stakeholders based on their knowledge and background. In the self-developed checklist, there is nothing to ensure that all criteria will be studied, but this personal initiative ensures that the same criteria have been studied for a maintainability analysis.

- The third part of the semistructured interview was to evaluate to what extent HFE is integrated into the design process in maintainability by using two questions and a flowchart of the design process (Figure 2). This flowchart is composed of nine steps and has been designed by reviewing technical documents and literature (Clarkson & Eckert, 2010). It provided a quick and precise representation of each milestone during the design process of the maintainability department. All participants ($n = 15$) before annotating the flowchart confirmed that this flowchart represents the current process and practices of maintainability, and no changes were made on the final version of the flowchart used to collect data.

The maintainability engineers and technicians had two possibilities for taking into account HFE during the whole design process: (a) carrying out HFE analysis and (b) collaborating with other services to exchange and reach a compromise between mechanical criteria and HFE requirements. Therefore, each participant had to annotate red and/or yellow landmarks on the flowchart (Figure 2) if he performed HFE analysis or only discussed/collaborated with regard to HFE at each milestone. Based on this approach, we identified four typologies of stakeholders (engineers and technicians):

- Stakeholders performed HFE analysis: The engineer/technician applies a technical-scientific approach to carry out an HFE analysis.
- Stakeholders performed collaboration: The engineer/technician only collaborates and exchanges with other departments about HFE—without conducting an HFE analysis.
- Stakeholders performed both HFE analysis and collaborations: The engineer/technician carries out the HFE analysis and then collaborates/exchanges with the other departments.
- Stakeholders performed neither HFE analysis nor collaboration: The engineer/technician does not apply HFE principles in the design process.

3.3 | Data analysis

The Mann–Whitney *U* statistical test was used to compare the average percentage of the studied criteria for maintainability analysis and the used tools. We hypothesized that the more studied criteria are found, the more tools should be used for evaluation. Fisher's exact test was used to statistically analyze the difference between the stakeholders performing HFE analysis and implementing collaborations. Cochran's *Q* test was also used to analyze whether the level of HFE integration was significantly different between the milestones of the design process ($p < 0.05$ was accepted as statistically significant).

4 | RESULTS

This survey showed that the majority of the engineers and technicians in the design office had acquired ergonomics skill and knowledge through their work experience: 67% in physical ergonomics, 40% in organizational ergonomics, and only 7% in cognitive ergonomics. Only one engineer confirmed having taken ergonomics training in his academic education. No differences were observed between technician and engineers, and we analyzed their answers combined for the rest of the results.

Figure 3 shows the proportion of those using the simulation tools—whatever the step of the design process. Physical mock-up (scaled 1:1) is the most used simulation tool, as 80% of the maintainability stakeholders used it to evaluate the design. CAD (73.3%), virtual reality (66.7%), and DHM (46.7%) were the other simulation tools

TABLE 2 Average percentage of studied ergonomics criteria and tools used

Categories of criteria and tools	Criteria	%	Tools	%
Environmental ergonomics	Airborne quality	26.7	Vibration exposure meter	6.7
	Lighting	20	Lux meter	0
	Sound environment	20	Direct observation with standard evaluation checklist	6.7
	Thermal environment	20	Direct observation with a self-developed checklist	13.3
	Vibration	6.7	Video observation with a self-developed checklist	0
			Sound meter	13.3
			Thermometer, hygrometer	0
Physical activity	Movement analysis	53.3	Accelerometer	0
	Effort/force	86.7	Dynamometer	13.3
	Posture	80	Electromyogram	0
	Duration of effort	33.3	Electrocardiogram	6.7
			Revised NIOSH equation	6.7
			Goniometer	0
			Direct observation with standard evaluation checklist	33.3
			Direct observation with a self-developed checklist	60
			Video observation with a self-developed checklist	6.7
			Task analysis (by video software analysis)	0
			Motion capture device	13.3
Work organization	Workstation layout	13.3	Chronometer	6.7
	Autonomy	20	Direct observation with standard evaluation checklist	33.3
	Safety of work area	40	Direct observation with a self-developed checklist	0
	Training	13.3	Video observation with a self-developed checklist	13.3
	Monotony	6.7	Task analysis (by video software analysis)	0
	Repetitively	20		
	Duration of activity	26.7		
Sensorial and cognitive activity	Cognitive workload	0	Chronometer	6.7
	Human error	46.7	Direct observation with standard evaluation checklist	20
	Decision latitude	6.7	Direct observation with a self-developed checklist	13.3
	Visual field	46.7	Task analysis (by video software analysis)	13.3
	Feedback understanding	0	Psycho-physiological measurements (biological data and electroencephalography)	0
			Questionnaire on Psychosocial Risk (Karasek)	6.7
			Questionnaire on the mental workload (Nasa-TLX)	6.7
Occupational safety and health	Work accident	20	Safety and occupational risks assessment checklist	20
	Complaints of operators	33.3	Statistical tools (to analyze reports of accidents at work and occupational diseases)	0
Characteristics of operators	Anthropometry	80	Statistical tools (to compare subjects)	26.7
	Background and experience	6.7	Questionnaire	13.3
			Anthropometric kit	0
Total***		29.1 ± 12.3		10.3 ± 6.3

Note. The Mann–Whitney *U* test was used to test the gap between studied ergonomics criteria and tools used ($n = 15$; $^{***}p \leq 0.001$).

that were most frequently used in the design process. The maintainability stakeholders used these simulation tools to anticipate the maintenance operator activities for either design/mechanical reasons or HFE purposes.

Table 2 presents the consideration of ergonomics criteria and associated tools in the design process by maintainability stakeholders. These criteria and tools were defined according to the previous studies (Bernard et al., 2017; Kausalya & Srinivasan, 2012; Li & Buckle, 1999; Nishanth et al., 2015; Parsons, 2000; Salvendy, 2012). Within all categories, we compared the average difference between the percentage of studied criteria and the percentage of tools used.

The Mann–Whitney *U* test showed a significant difference between the average percentage of HFE criteria studied (29.1 ± 12.3) and tools (10.3 ± 6.3) used to evaluate them ($p \leq 0.001$). On average, 63.3% (±12.3) of the maintainability stakeholders studied the physical activity criteria, 18.7% (±3.6) of them environmental ergonomics criteria, and 20% (±5.5) the criteria of work organization (Table 2). The criteria most frequently studied by maintainability stakeholders were posture (80%) and effort/force (86.7%) in the physical activity category, and the anthropometry (80%) criterion in the characteristics of operators' category. The maintainability stakeholders mostly used direct observation with either the standard or self-developed checklist to evaluate different categories of HFE criteria. The self-developed evaluation checklist was applied by 60% of the participants for evaluating physical activity criteria. Most of the maintainability stakeholders used less than 20% of tools—regardless of which category they belonged

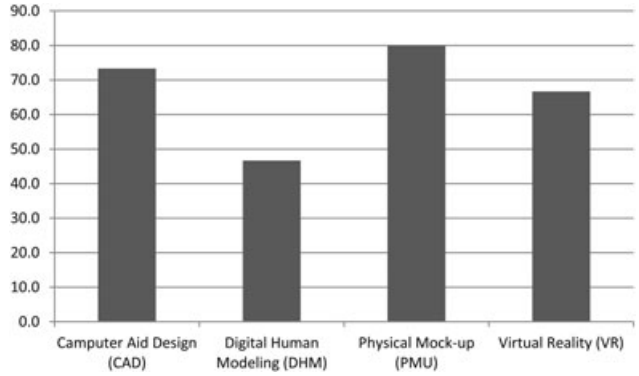


FIGURE 3 The distribution of using simulation tools by maintainability stakeholders, whatever the steps of the design process

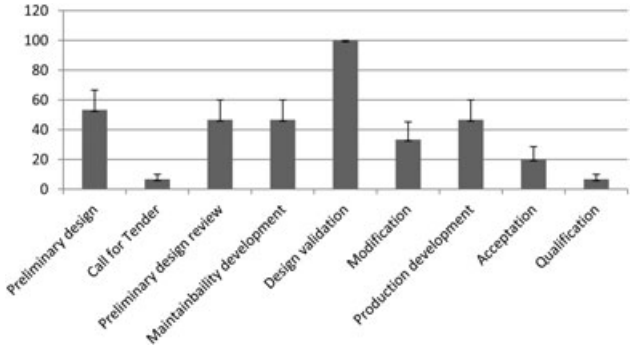


FIGURE 4 Percentage of human factor and ergonomics (HFE) integration (such as ergonomics analysis, collaboration, and ergonomics analysis plus collaboration) at each milestone of the design process in maintainability. Cochran's *Q* test showed a significant difference of ergonomics integration at each milestone ($p \leq 0.05$)

to—and 32.4% of them did not apply any tools. Our results show that a large variety of criteria are studied (23 out of 25; 92%) and various tools are used (23 out of 35; 65.7%) to explore these criteria, but a few maintainability stakeholders studied the criteria and applied the related tools (29.1% ± 12.3 for criteria and 10.3% ± 6.3 for tools).

Table 3 shows the level of HFE integration into the design process. The results revealed that 46.7% of the maintainability stakeholders performed both HFE analysis and collaboration at the preliminary design review milestones—Fisher's exact test showed the statistically significant relationship between conducting HFE analysis and collaborating at this milestone (Table 3). However, only 26% of maintainability stakeholders performed both HFE analysis and collaboration at the design validation milestone, whereas 40% of them only performed HFE analysis and 33.3% only collaborated with other departments (Table 3). The relationship between HFE analysis and collaboration was insignificant at this milestone. The percentage of maintainability stakeholders who performed HFE analysis was low at the other milestones, and the initial hypothesis was not confirmed (Table 3).

Figure 4 shows the level of HFE integration (HFE analysis, collaboration, and HFE analysis plus collaboration) at the different milestones of the design process. Our findings showed a high percentage of nonintegration of HFE at the call for tenders (93.3%), acceptation/validation (80%), and qualification (93.3%) milestone (Figure 4).

We found a significant difference between various milestones of the design process regarding the level of HFE integration ($p \leq 0.05$). This showed the heterogeneity of HFE integration at the different milestone of the design process.

5 | DISCUSSION

This study was designed to investigate whether HFE is systematically integrated into the design process of maintainability in a helicopter manufacturing industry. The participants of the study were the maintainability stakeholders including engineers and technicians, and we analyzed their answers altogether because the working methodology related to HFE was similar between all participants. We observed that a large variety of criteria were studied and various associated tools were used. However, very few maintainability

TABLE 3 The distribution of performing human factor and ergonomic (HFE) analysis, collaboration, and both at each milestone of the design process

Milestones	HFE analysis *n* (%)	Collaboration *n* (%)	HFE analysis and collaboration *n* (%)	Neither HFE analysis nor collaboration *n* (%)
Preliminary design	2 (13.3)	2 (13.3)	4 (26,7)	7 (46.7)
Call for tenders	0 (0)	0 (0)	1 (6.7)	14 (93.3)
Preliminary design review**	0 (0)	(0)	7 (46.7)	8 (53.3)
Maintainability development	3 (20)	1 (6.7)	3 (20)	8 (53.3)
Design validation	6 (40)	5 (33.3)	4 (26.7)	0 (0)
Modification	3 (20)	0 (0)	1 (13.3)	10 (66.7)
Production development	4 (26.7)	1 (6.7)	1 (13.3)	8 (53.3)
Acceptation/validation	1 (6.7)	0 (0)	2 (13.3)	12 (80)
Qualification	1 (6.7)	0 (0)	0 (0)	14 (93.3)

Note. Fisher's exact test was used to test the relationship between HFE analysis and collaboration ($n = 15$; $^{**}p \leq 0.01$).

stakeholders applied this kind of analysis. Only some of the tools associated with the ergonomic criteria studied by the engineers and technicians were used to assess those criteria objectively. We found that the majority of the maintainability stakeholders want to integrate HFE into their work, but they applied HFE only through their own experience and intuition—without any systematic method. Furthermore, some ergonomics tools required background and training that the maintainability stakeholders did not have sufficient knowledge of to use. Therefore, the efficiency and reliability of current ergonomics studies may be questioned (Bernard et al., 2017; Broberg, 2007). A wide range in answers to our interview showed that each maintainability stakeholder integrated HFE in an unsystematic way without any predefined methodology. The maintainability stakeholders also suffered from insufficient knowledge and expertise to apply HFE at each milestone of a project, and the HFE tools have often been used without sufficient HFE education. The participation of HFE experts supporting maintainability projects alongside the design office might be a solution to improve the HFE integration. However, the maintainability stakeholders must answer plenty of HFE problematics, so that one HFE expert might not be sufficient to have reliable results. Employing several HFE experts and applying the HFE tools in a suitable manner might be costly and time consuming. These reasons explain why there are no enough HFE experts alongside the design office. Broberg (2007) analyzed 20 different industries including electronics, chemicals, and construction and revealed lack of time, work environment knowledge, and methods/tools as the primary constraints to integrating HFE into their activity. The results of this study are close to the results obtained in our investigation—especially the methods/tools already known to, but underutilized by the maintainability stakeholders. The stakeholders often have an idea about HFE elements and proceed based on this idea without trying to study it. They appropriate tools to progress on the solution and less on to study of the consequences of their design choices on health, the safety of operators, and the effectiveness of the human–machine relationship.

We have to dissociate the lack of knowledge in HFE and the lack of knowledge of the use of simulation tools for HFE analyzes. Maintainability stakeholders simulate the maintenance activity (assembly/disassembly, accessibility, or torque check) using several simulation tools (physical mock-up, CAD, virtual reality, and DHM) for designs based on the HFE principals. However, there appears to be a challenge in objectivizing their results due to their lack of HFE skills and knowledge (Bernard, Zare, Sagot, & Paquin, 2018; De Sa & Zachmann, 1999; Regazzoni & Rizzi, 2014; Zare, Larique, Chevriau, & Sagot, 2018). The standard simulation tools shared by maintainability stakeholders and ergonomists should represent a reliable basis for a similar HFE study (Chitescu, Galland, Gomes, & Sagot, 2003; Lorisson, 2010; Sagot et al., 2003; Sharma, Singhal, & Sonia, 2018). Previous studies showed that simulation tools are efficient at covering all categories of indicators such as organizational, economic, and technical factors. They allow the maintainability stakeholders to integrate human factors very early in the design process (De Leon et al., 2012; Perez & Neumann, 2010). Our findings showed that the collaborative aspect of simulation tools for HFE is less frequently considered as a way to achieve the compromises between stakeholders and various requests of the design, which suggests that the simulation tools were not sufficiently exploited. In particular, the simulation tools used today in maintainability can be considered as intermediary objects (IOs) and can support social and communication interactions (Mahdjoub et al., 2013; Vinck, 2009). Additionally, with preparation and organization of the project reviews specifically around their IOs, it appears that all of the design engineers do not meet to negotiate on behalf of their own needs and specifications. Instead, they are involved so as to act as specialists in their field to have collaborative exchanges during a convergence stage (Broberg, Andersen, & Seim, 2011). Each design engineer, therefore, has an overall understanding of the expectations of other stakeholders in the design office, which dissuades, or even prevents, them from moving forward without the agreement of the entire group (Vinck., 2009). If this was not the case, it would lead to a loss of data and the compromise would not be optimal. Therefore, the IO appears as a pedagogical, popularization tool through which scenarios can be played out to show the limits and benefits of the requirements emitted by each of the design stakeholders—presented and supervised by an HFE expert.

In our study, we observed three kinds of approach to integrate HFE within each milestone of the design process in maintainability (HFE analysis, collaboration with other departments, or both), which help to achieve a compromise between HFE requirements and mechanical criteria. The results showed only at the preliminary design review milestone if a stakeholder performed an HFE analysis; after this, collaboration with other services would be initiated. This milestone is crucial in the design process (Blanchard, 2014) because the technical specifications of a helicopter are determined and validated at this milestone based on the needs (general policy and standards steps) of PLM. The general policy was based on the analogy and comparison with other helicopter types. The most sensitive parts required particular attention and regular maintenance. The engine, cockpit, or hydraulic systems are examples of sensitive parts defined very early in the design process to ensure and control the reliability of these parts alongside of the product lifecycle. This could be the main reason why the maintainability stakeholders integrate HFE more seriously at this milestone, although the proportion of HFE integration is low during the design process. Furthermore, HFE was also integrated into another crucial milestone: Design validation, which is a junction between the preliminary phases of the design development and the manufacturing phase. At this milestone, all the maintainability stakeholders used at least one approach to HFE integration (43% carried out only HFE analysis, 33.3% only collaborations, and 26.7% both of them). We also noted that the maintainability stakeholders carried out either HFE analysis without collaboration or collaborations without HFE analysis. A high disparity of HFE integration was observed within the maintainability department. The proportion of nonintegration of ergonomics dominates with percentages oscillating between 43% and 93% for the majority of milestones. The significant differences between each milestone of the design process confirmed

the heterogeneity of the HFE integration—regardless of the methods for practicing ergonomics—in the design process. Based on our knowledge, few studies have investigated the percentage of HFE integration in process design of the aeronautics industry. Most of the recent studies have presented digital tools and physical mock-ups that can be used unsystematically at any milestone of the design process, without providing any evidence on the integration of these methods in the design process (Amundarain et al., 2003; Das & Sengupta, 1996; Di Gironimo et al., 2004; Geng et al., 2013). Very few researchers have also quantified the impact of HFE integration on process design; most of the previous studies have assessed the impact of HFE on costs in the manufacturing phase (Giacomin, 2014; Johnson, Sian, & Watson, 2000; Van Horenbeek & Pintelon, 2014; Zare, Croq, Hossein-Arabi, Brunet, & Roquelaure, 2016).

This survey among maintainability stakeholders evaluated their level of knowledge concerning the physical, organizational, and cognitive factors that influence directly the maintainability design process. However, this study does not address human errors, cognitive analysis, and usability testing during the design process. Various studies have developed methodologies to understand the type of errors after an incident/accident that occurs during the maintenance tasks (Liu, Chi, & Li, 2013; Reason, 1990; Shappell & Wiegmann, 2001). However, very few studies have developed a dedicated process to anticipate the potential human error during the development. The questionnaire used to collect data is the authors' tool and its reliability was not determined; however, three experts, except the authors, read and confirmed the validity of the questions. Furthermore, the data were collected based on a semistructured methodology, with an expert that accompanied the respondents to provide supplementary information about questions in case of need. The presence of expert during the filling of the questionnaire by the maintainability stakeholders ensured the right comprehension of the questions and increased the quality of data collected. This study included a small sample of maintainability stakeholders including engineers and technicians. This parameter might be a source of bias in our results, and it might be interesting to perform an extensive analysis through the aviation industry. However, based on the authors' knowledge and our exchange with the maintainability stakeholders of the aviation entity of the industry under study, the current results seem consistent and probably generalizable at least to the aviation industries.

6 | RECOMMENDATION

It seems necessary to improve the structure of the integration of HFE into the design process in maintainability. To provide sufficient information regarding various HFE principles, maintainability stakeholders have to consider:

- all necessary HFE parameters according to the studied situation;
- adequate simulation tools depending on the milestone under study; and
- homogeneous HFE integration within all steps of the design process.

Further study is required to develop a methodology that allows the maintainability stakeholders to follow and respect HFE requirements—in collaboration with the HFE experts.

7 | CONCLUSION

A low level of HFE integration was observed at the various milestones of the design process of the maintainability and the physical aspect of HFE was taken into consideration for the most part. Furthermore, the HFE integration was carried out sporadically without a predefined methodology. The HFE knowledge among maintainability stakeholders was insufficient, which led to underutilizing the simulation tools and HFE methods for maintainability analysis. This survey showed that maintainability stakeholders have to carry out HFE analyses and collaborate with the other departments to use arguments for HFE to convince those who make a decision on the final compromise by HFE arguments.

Further investigation may be necessary to develop an approach that allows the maintainability stakeholders to harmonize their methods, to optimize the use of simulation tools, and to integrate all aspects of HFE (physical, cognitive, and organizational factors) in the design process.

8 | KEY POINTS

- The HFE integration is performed unsystematically—without any specific methodology— by HFE analysis and collaboration with the other engineering departments throughout the design process of maintainability.
- Maintainability stakeholders did not consider HFE in more than 50% of the milestones—which suggests that the nonintegration of HFE dominated in the aviation design process; however, for some milestones, the maintainability stakeholders who carried out an HFE analysis collaborated to reach a compromise between the HFE elements and the design requirements.
- The standard simulation tools (physical and digital tools) shared by ergonomists and engineers can be better exploited to assess HFE if the stakeholders in the design office know the right practices and use the simulation tools to carry out collaborative session.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank all the staff of the factory under study (Airbus Helicopter) for their kind collaboration and efforts in performing this study. Our special thanks go to the operators who consented to participate in this experimentation. The first results of this study have already been presented at the Reliability & Maintainability Symposium, IEEE Conference, which took place at Orlando (FL) in January 2017. The French National Association of Research and Technology (Agence Nationale de la Recherche et des Technologies (ANRT, N°2015/1306) financially supported this study.

ORCID

Fabien Bernard http://orcid.org/0000-0003-1420-674X

REFERENCES

AFIM (2004). French Association of Maintenance Engineers-Health and safety at work: National Maintenance Guide.

Amundarain, A., Borro, D., Matey, L., Alonso, A. G., & de Guipúzcoa, T. (2003). Proceedings of virtual concept, Biarritz, 5–7.

Andersen, J. H., Kaergaard, A., Frost, P., Frølund thomsen, J., Peter bonde, J., 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. https://doi.org/10.1097/00007632-200203150-00017

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. https://doi.org/10.1177/0018720813491424

Baker, M., Détienne, F., & Burkhardt, J. M. (2013). *Quality of collaboration in design: Articulating multiple dimensions and viewpoints*. In 1st Interdisciplinary Innovation Conference, Telecom ParisTech, Paris, France. https://doi.org/10.1080/15710882.2012.729063

Bernard, F., Bazzaro, F., Paquin, R., & Sagot, J. C. (2017, January). *Consideration of human factors in aeronautical maintainability*. Annual Reliability and Maintainability Symposium, Orlando, FL, IEEE. https://doi.org/10.1109/RAM.2017.7889653

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2018). Virtual reality simulation and ergonomics assessment in aviation maintainability, *Congress of the International Ergonomics Association* (141–154). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_15

Berrah, L. (2002). *L'indicateur de performance: Concepts et Applications*. Cépadues-Editions, France.

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*, 11-13.

Bradburn, N. M., Sudman, S., & Wansink, B. (2004). *Asking questions: the definitive guide to questionnaire design-for market research, political polls, and social and health questionnaires*. San Francisco: John Wiley & Sons.

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. https://doi.org/10.1002/hfm.20081

Broberg, O., Andersen, V., & Seim, R. (2011). Participatory ergonomics in design processes: The role of boundary objects. *Applied Ergonomics*, *42*(3), 464–472. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2010.09.006

Cafakelli, E., Cain, W. S., & Stevens, J. C. (1977). Effort of dynamic exercise: Influence of load, duration, and task. *Ergonomics*, *20*(2), 147–158. https://doi.org/10.1080/00140137708931613

Carayon, P., & Smith, M. J. (2000). Work organization and ergonomics. *Applied Ergonomics*, *31*(6), 649–662. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00040-5

Chang, Y. H., & Wang, Y. C. (2010). Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians. *Safety Science*, *48*(1), 54–62. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.05.004

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. https://doi.org/10.3357/AMHP.4817.2017

Chitescu, C., Galland, S., Gomes, S., & Sagot, J. C. (2003). Virtual reality within a human-centered design methodology. In *5th International Conference on Virtual Reality* (pp. 99–104). Laval.

Clarkson, J., Eckert, C. (Eds.) (2010). *Design process improvement: A review of current practice*. Springer Science & Business Media.

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.

Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach. *Applied Ergonomics*, *27*(3), 157–163. https://doi.org/10.1016/0003-6870(96)00008

De Leon, P. M., Díaz, V. G. P., Martínez, L. B., & Marquez, A. C. (2012). A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes. *Reliability Engineering & System Safety*, *100*, 84–92. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.018

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. https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00047-3

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.

European Aviation Safety Authority (2011). Annex to ED Decision 2011/004/R, Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Large Aeroplanes (CS-25), Amendment 11. European Aviation Safety Authority, Luxembourg, July 4.

European Agency for Safety and Health at Work (2010). *Safe maintenance in practice* (102pp. Luxembourg: Publications Offices of the European Union

European Standard (2010) CEN/TC319. EN13306:2010. *Maintenance-maintenance terminology*. Author, Bruxelles.

FAA (2012). *FAR Part 25, Airworthiness standards: Transport category airplanes*. Federal Aviation Regulation (FAR), Title 14, Code of Federal Regulations (CFR). https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?node=14:1.0.1.3.11

Falzon, P. (2004). *Ergonomie*. Presses Universitaires de France, Paris.

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) https://doi.org/10.4000/pistes.3725

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. https://doi.org/10.1016/j.cad.2013.01.007

Germani, M., Mengoni, M., & Peruzzini, M. (2012). An approach to assessing virtual environments for synchronous and remote collaborative design. *Advanced Engineering Informatics*, *26*(4), 793–813. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.06.003

Giacomin, J. (2014). What is human centred design? *The Design Journal*, *17*(4), 606–623. https://doi.org/10.2752/175630614X14056185480186

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.

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.

Hobbs, A. (2000). Maintenance "error," Lessons from the ATSB survey. *Flight Safety Australia*, 36–37.

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), 271–280. https://doi.org/10.1016/S0736-5845(97)00006-9

IEA, I. (2000). What is Ergonomics-Definition and Domains of Ergonomics.

Johnson, W. B., Sian, I. B., & Watson, J. (2000). *Measuring the impact of human factors interventions* (No. 2000-01-2091). SAE Technical Paper. https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2000-01-2091/

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

Kausalya, R., & Srinivasan, V. (2012). Need for health awareness training program for employees in Indian Industries. In *Technology Management Conference (ITMC), 2012 IEEE International* (pp. 144–150). IEEE. https://doi.org/10.1109/ITMC.2012.6306388

Land, J., & Weitzman, C. (1995). How HUMS systems have the potential of significantly reducing the direct operating cost for modern helicopters through monitoring, *Annual Forum Proceedings* (Vol. 51, *p. 744. American Helicopter Society*.

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. https://doi.org/10.1016/j.compind.2007.06.022

Liu, S. Y., Chi, C. F., & Li, W. C. (2013). The application of human factors analysis and classification system (HFACS) to investigate human errors in helicopter accidents. In *International Conference on Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics* (pp. 85–94). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39354-9_10

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

Lorisson, J. (2010). Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus. *Techniques de l'ingénieur TE*, *5*, 965.

Lu, Z., Zhou, J., & Li, N. (2015). Maintainability fuzzy evaluation based on maintenance task virtual simulation for aircraft system. *Eksploatacja i Niezawodność*, 17*(4)*.

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 (pp. 19–22). Seoul.

Mali, S. C., & Vyavahare, R. T. (2015). An ergonomic evaluation of an industrial workstation: A review. *International Journal of Current Engineering and Technology*, *5*(3), 1820–1826.

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

Neumann, P. (2006). *Inventory of tools for ergonomic evaluation*. Arbetslivsinstitutet förlagstjänst, Sweden.

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), 9–13. https://doi.org/10.5120/19852-1764

Norros, L. (2014). Developing human factors/ergonomics as a design discipline. *Applied Ergonomics*, *45*(1), 61–71. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2013.04.024

Parsons, K. C. (2000). Environmental ergonomics: A review of principles, methods and models. *Applied Ergonomics*, *31*(6), 581–594. https://doi.org/10.1016/S0003-6870(00)00044-2

Perez, J., & Neumann, W. P. (2010). *The use of virtual human factors tools in industry–A workshop investigation* (Human Factors Engineering Lab Technical Report No. 3). Ryerson University, Torronto. https://doi.org/10.1002/hfm.20541

Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., & Papageorgiou, L. G. (2000). Process design for maintainability: An optimization approach. *Computers & Chemical Engineering*, *24*(2), 203–208. https://doi.org/10.1016/S0098-1354(00)00514-7

Rajesh, R., & Srinath, R. (2016). Review of recent developments in ergonomic design and digital human models. *Industrial Engineering & Management*, *6*, 186. https://doi.org/10.4172/2169-0316.1000186

Reason, J. (1990). *Human error*. England: Cambridge university press.

Reason, J., & Hobbs, A. (2017). *Managing maintenance error: A practical guide*. CRC Press

Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, *11*(1), 10–19. https://doi.org/10.1080/16864360.2013.834130

Sagot, J. C., Gouin, V., & Gomes, S. (2003). Ergonomics in product design: Safety factor. *Safety Science*, *41*(2-3), 137–154. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(02)00038-3

Salvendy, G. (2012). *Handbook of human factors and ergonomics*. John Wiley & Sons.

Shanmugam, A., & Paul Robert, T. (2015). Human factors engineering in aircraft maintenance: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *21*(4), 478–505. https://doi.org/10.1108/JQME-05-2013-0030

Shappell, S. A., & Wiegmann, D. A. (2001). Applying reason: The human factors analysis and classification system (HFACS). *Human Factors and Aerospace Safety*, *1*, 59–86.

Sharma, H. K., Singhal, P., & Sonia, P. (2018). Computer-assisted industrial ergonomics: A review, *Ergonomic Design of Products and Worksystems-21st Century Perspectives of Asia* (37–48). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5457-0_4

Sheikhalishahi, M., Pintelon, L., & Azadeh, A. (2016). Human factors in maintenance: A review. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *22*(3), 218–237. https://doi.org/10.1108/JQME-12-2015-0064

Shi, Y., & Liu, Y. (2012). Application of DELMIA on maintainability design of aircraft. In *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/iccasm.2012.195

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.

Stark, J. (2015). *Product lifecycle management* (Vol. 1, *1–29). Cham: Springer*

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. https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.02.006

Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. *Revue d'anthropologie des connaissances*, *3*(1), 51–72. https://doi.org/10.3917/sss.322.0057

Waters, T. R., Putz-Anderson, V., & Garg, A. (1994). *Applications manual for the revised NIOSH lifting equation*.

Zare, M., Croq, M., Hossein-Arabi, F., Brunet, R., & Roquelaure, Y. (2016). Does ergonomics improve product quality and reduce costs? A review article. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *26*(2), 205–223. https://doi.org/10.1002/hfm.20623

Zare, M., Larique, M., Chevriau, S., & Sagot, J.-C. (2018). Application of virtual reality to improve physical ergonomics in a control room of a chemical industry, *Congress of the International Ergonomics Association* (296–308). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_31

Zhou, D., Chen, J., Lv, C., & Cao, Q. (2016). A method for integrating ergonomics analysis into maintainability design in a virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *54*, 154–163. https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.06.003

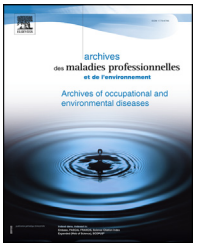
Zwingelstein, G. (1996). *La maintenance basée sur la fiabilité* (199pp. Hermès.

How to cite this article: 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. https://doi.org/10.1002/hfm.20792

Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 82 (2021) 170—183

Disponible en ligne sur
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France
EM|consulte
www.em-consulte.com



ARTICLE ORIGINAL

Dimensions physiques et cognitives : vers une nécessaire prise en compte en maintenabilité aéronautique

Physical and cognitive dimensions: Towards a necessary consideration in aviation maintainability

F. Bernard[a,b,*], **M. Zare**[b], **C. Murie**[a], **J.-C. Sagot**[b]

[a] *Airbus Helicopters, Aéroport International Marseille-Provence, 13725 Marignane cedex, France*
[b] *Pôle de recherche ERgonomie et COnception des Systèmes (ERCOS), Laboratoire ELLIADD (E.A. 4661)—UTBM - Université Bourgogne Franche Comté (UBFC), 90010 Belfort cedex, France*

Reçu le 8 juillet 2020 ; accepté le 26 octobre 2020

MOTS CLÉS
Ergonomie ;
Physiologie ;
Maintenance ;
Maintenabilité ;
Aéronautique

Résumé
Objectifs. — La maintenance est une activité indispensable, complexe, variée et pénible qui sort souvent du cadre de nombreuses normes ou de la législation en termes de sécurité au travail. En effet, dans de nombreux secteurs industriels la variabilité des tâches qui est demandée aux opérateurs impose souvent des contraintes mal comprises et peu étudiées. Cet article vise à mettre en avant la nécessité de mieux considérer les contraintes physiques et cognitives qui peuvent en découler. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux efforts physiques et à la charge mentale pouvant impacter durablement l'activité des opérateurs de maintenance.
Méthode. — Nous avons observé et analysé les activités physiques (fréquence cardiaque) et cognitives d'opérateurs de maintenance réalisant quatre tâches de maintenance représentatives de celles réalisées régulièrement sur hélicoptère. Les opérateurs, au nombre de 7, ont été sélectionnés en fonction de leur expérience. Également, afin de pouvoir interpréter nos résultats concernant le niveau de pénibilité physique, évalué à partir de la fréquence cardiaque, nous avons souhaité retenir une population homogène en termes d'activités physiques et sportives.

* Auteur correspondant.
Adresse e-mail : fabien.bernard@airbus.com (F. Bernard).

https://doi.org/10.1016/j.admp.2020.10.004
1775-8785/© 2020 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Résultats. — La mesure de la fréquence cardiaque a mis en avant des Coûts Cardiaques Relatifs très élevés sur trois des quatre tâches définies initialement comme sans effort physique. De plus, la charge mentale semble être impactée par la charge physique sur l'ensemble des quatre tâches étudiées alors que ces mêmes tâches sont toutes considérées comme simples, courtes, appelant un savoir et un savoir-faire de base, sans usage d'outils spécifiques, sans mémorisation de séquences longues et complexes.
Conclusion. — L'analyse des dimensions physiques et cognitives de quatre tâches de maintenance récurrentes sur hélicoptère a mis en évidence qu'une prise en compte de ces deux indicateurs de pénibilité est nécessaire pour mieux organiser le travail en atelier. De plus, afin d'anticiper l'activité des opérateurs et leurs contraintes pendant les phases de conception, il semble essentiel que ce type d'analyses soit connu des concepteurs.

KEYWORDS
Ergonomics;
Physiology;
Maintenance;
Maintainability;
Aeronautics

Summary
Aims. — Maintenance is a complex, multi-faceted and difficult activity that deviates from the requirements of many occupational safety standards or legislation. In many industrial sectors, the variability of the tasks performed by maintenance operators involves a number of ergonomic problems that are still poorly understood and little studied. This article aims to illustrate the necessity to better consider physical and cognitive aspects of maintenance. We will particularly focus on the physical efforts that can permanently impact the operators' activity.
Method. — We observed the physical activity (heart rate) and the cognitive dimension of maintenance operators performing four maintenance tasks representative of those regularly performed on helicopters. Seven operators were selected based on their experience. Also, to be able to interpret our heart rate results, we selected a homogeneous population in terms of sports practice.
Results. — The measurement of the heart rate highlighted very high Relative Cardiac Costs on three out of the four tasks initially defined as without physical effort. In addition, the mental workload seems to be impacted by the physical load on all four tasks studied while these same tasks are all considered to be simple, short, requesting a basic knowledge and know-how, without the use of specific tools, without memorizing long and complex sequences.
Conclusion. — Analysis of the physical and cognitive dimensions of four recurring maintenance tasks on helicopters has shown that taking these two occupational health risk indicators into account is necessary to improve organization in the workshop. In addition, in order to anticipate the activity of operators and their constraints during the design phases, it seems essential that this type of analysis be known by designers.

Introduction

Pour être fiable et disponible, un produit/système doit être maintenu en bon état tout au long de sa vie. Il doit ainsi assurer la fiabilité et la qualité pour lesquelles il a été conçu initialement [1]. Cela implique une activité de maintenance très régulière, qu'elle soit planifiée ou inopinée lorsqu'une panne survient. En effet, l'organisation de la maintenance se révèle être complexe, changeante [1] et appelle de nombreux savoirs et savoir-faire [2]. De plus, la maintenance est ancrée dans un cycle industriel où l'indicateur phare reste davantage les coûts que la santé et la sécurité des opérateurs. Plusieurs auteurs ont confirmé ce constat général au travers d'études menées dans plusieurs industries telles que l'exploitation des hélicoptères [3], le secteur automobile voire encore celui du nucléaire [4]. Notons néanmoins que la prise en compte de l'opérateur, et en particulier de sa santé et de sa sécurité, prend une place de plus en plus centrale dans la conception des activités de maintenance. Afin de préserver durablement la performance des machines et la sécurité des personnes, la maintenance est donc devenue une activité de services qui demande un haut niveau d'exigence et des compétences particulières de la part des opérateurs de maintenance spécialisés. Dans ce cadre, 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, à 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 est issue du retour d'expériences du terrain, notamment l'organisation de la maintenance qui est reconnue pour engendrer une activité de travail pénible, voire très pénible [5]. En effet, au-delà de l'organisation, les tâches réalisées par les opérateurs sont très variées et demandent également des savoirs

et savoir-faire multiples. Par exemple, dans le secteur aéronautique, les opérateurs sont souvent amenés à devoir réaliser des tâches touchant aussi bien des ensembles mécaniques, que des ensembles hydrauliques voire électriques [1]. C'est dans ce cadre que nous nous intéressons aux dimensions physiques et cognitives des opérateurs en maintenance, afin qu'elles soient mieux considérées et prises en compte en maintenabilité, c'est-à-dire, en phase de conception des tâches de maintenance. Cette étude, réalisée au sein même d'un industriel aéronautique, constructeur d'hélicoptères, a ainsi un double enjeu. Premièrement, il y a la volonté de mettre en évidence la pénibilité physique et mentale de l'activité de maintenance aéronautique. Le deuxième enjeu est de faire prendre conscience, aux concepteurs de la maintenance, des difficultés réelles rencontrées par les opérateurs, à des fins de mieux comprendre les conséquences de leurs choix de conception.

Contexte général

L'ergonomie en maintenabilité

La maintenance est un domaine qui fait l'objet d'une norme européenne [6] 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 ». Ainsi, par définition, la maintenance est une action réalisée par un ou des opérateurs spécialisés régis par une organisation dédiée. Or, nous pouvons rappeler que la maintenance est une activité jugée longue et complexe [7,8]. Il existe de plus une forte diversité de tâches, d'environnements de travail,... pouvant être à l'origine de nombreuses plaintes de la part des opérateurs, voire d'accidents. Un sondage réalisé par l'Association Françaises des Ingénieurs en Maintenance (AFIM) auprès de 2500 opérateurs de maintenance à travers l'Europe, a montré que 62 % des opérateurs de maintenance jugent leur travail pénible. Plus précisément, il existe des facteurs de risques à l'origine de pressions temporelles, de réalisation de tâches non programmées, ou encore de risques avérés de troubles musculo-squelettiques [9]. En effet, l'opérateur, pour mener à bien sa mission, adopte des gestes, des postures pénibles, voire dangereuses, associés à des efforts souvent importants [10]. De plus, l'activité de maintenance est une succession de tâches, voire de sous tâches qui requièrent une forte concentration et engendrent dès lors une charge mentale connue et reconnue [11]. Par exemple, dans le domaine du transport, qu'il soit aéronautique, ferroviaire ou automobile, des systèmes mécaniques, hydrauliques ou encore électriques cohabitent très souvent dans des espaces réduits. L'opérateur doit ainsi gérer l'intervention de maintenance avec un savoir et un savoir-faire touchant de multiples domaines pour réaliser une seule tâche de maintenance. Dès lors, chacune de ces tâches, voire sous tâches, exigent des activités physiques (postures, gestes, efforts, ports de charge, déplacement,.), sensorielles (prise d'informations visuelles, sonores, communications,...) et mentales (prise de décisions, choix,...) importantes. Cette pénibilité entraîne notamment un taux d'accident du travail significatif. L'AFIM précise ainsi que ces derniers dans le secteur de la maintenance sont 30 % plus élevés que la moyenne nationale [9]. L'Agence Européenne pour la Santé et la Sécurité au Travail (2010) précise également que 15 % à 20 % de l'ensemble des accidents survenus en Europe en 2006 sont liés aux opérations de maintenance du travail, dont 10 % à 15 % sont mortels [12]. La maintenance représente également la deuxième cause d'incidents/accidents aériens, environ 12 %, après celle concernant les erreurs de pilotage [11,13]. La sauvegarde de la santé et l'amélioration de la sécurité des opérateurs de maintenance restent ainsi des enjeux majeurs des études en maintenabilité. Ces questionnements sont d'autant plus pertinents en aéronautique où les recommandations et les réglementations imposent des rythmes de maintenance réguliers, afin de veiller au respect des normes et standards en vigueur pour optimiser la sécurité. En effet, l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale) et l'ATA (Air Transport Association of American) définissent des recommandations à respecter pour assurer la maintenance et l'entretien des aéronefs dans le but d'accroître leur disponibilité tout en optimisant la fiabilité et les coûts [14,15]. Ces recommandations servent de références pour définir des standards par d'autres autorités comme l'EASA en Europe (European Union Aviation Safety Agency). De plus, la complexité de l'activité de maintenance est accentuée par le contexte opérationnel très compétitif et concurrentiel où les prestations doivent toujours se faire plus vite tout en assurant le même niveau de sécurité [16]. Nous pouvons aussi ajouter un facteur lié à la notion d'erreur qui, évidemment dans le contexte décrit, n'a pas sa place et est responsable de stress professionnel [17]. Ainsi, pour respecter la réglementation, les contraintes de l'opérateur, doivent être anticipées au plus tôt dans les processus de conception afin de palier, autant que possible, aux aléas organisationnels du terrain. Dès lors, pour qu'un produit/système soit maintenu, il doit être conçu afin que la maintenance soit réalisable par un ou des opérateurs, dans des contextes multiples avec un minimum de connaissances et d'outillages spécifiques. Cette anticipation dans les phases de conception est réalisée par la maintenabilité qui se définit comme la « capacité d'un produit à être maintenu ou réparé facilement lors des opérations de maintenance pour qu'il retrouve les fonctions pour lesquelles il a été conçu » [18]. Cette norme précise également que la maintenabilité « peut-être quantifiée à travers des mesures appropriées ou des indicateurs » par les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité. Ainsi, selon la norme européenne EN 15341 les indicateurs en maintenabilité sont classés en trois catégories (techniques, économiques et organisationnelles) [19] et doivent, par définition, permettre d'observer sur une période donnée les évolutions d'un phénomène préalablement choisi [20,21]. Par exemple, dans la catégorie technique nous avons l'accessibilité physique ou visuelle, dans la catégorie économique nous avons les coûts de maintenance et enfin, dans la catégorie organisationnelle, nous pouvons citer le niveau d'entraînement [21]. Or, ces indicateurs sont développés par des ingénieurs-concepteurs pour prendre des décisions sur des principes de conception et de design industriel. Ils ne sont donc pas définis et destinés à prendre des décisions autour de l'ergonomie. Ainsi, l'ingénieur-concepteur, au-delà du manque de savoir et savoir-faire

dans cette discipline, n'a que très peu de ressources pour entrevoir la nécessité de conduire des analyses ergonomiques [25]. Ces dernières auraient pour objectif d'étudier l'activité réelle des opérateurs de maintenance en étudiant les trois composantes définies par l'organisation internationale de l'ergonomie (IEA) [22], à savoir les composantes physiques, organisationnelles et cognitives de l'activité de travail conduite, incluant ainsi les variabilités entre les opérateurs, les différentes stratégies ou régulations déployées pour réaliser les tâches de maintenance ou encore les niveaux coopérations. Ainsi, dans un contexte de bureau d'études, les travaux de Broberg, 2007, Kaljun, & Dolšak, 2012, Bernard et al., 2019a ont montré que le manque de temps, de connaissances sur l'environnement de travail ainsi que le manque de méthodes pour évaluer les conditions de travail sont les principales contraintes à l'intégration de l'ergonomie dans leurs activités de conception de la maintenance [23—25]. De plus, de nombreuses études s'attachent à étudier/anticiper les contraintes de l'activité de maintenance pendant les phases de conception, tâche par tâche et non dans une succession de tâches [10,26]. L'anticipation, le réalisme des conclusions et des prises de décisions pendant les phases de conception peuvent donc encore questionner quant aux futurs impacts pour l'activité de l'opérateur. Dans ce contexte, Lhuilier, 2010, introduit même la notion « d'invisibilité » du travail réel exprimant l'écart croissant entre ceux qui conçoivent (théorie) et ceux qui exploitent (pratique) [27]. Dès lors, il devient essentiel d'apporter aux ingénieurs-concepteurs en maintenabilité une meilleure connaissance de l'activité réelle de la maintenance aéronautique afin qu'ils puissent être plus à même de connaître les conséquences de leurs choix de conception en termes de sécurité, de santé et d'efficacité.

La charge physique et mentale, éléments nécessaires à la compréhension de l'activité de maintenance

Dans le cadre de la pénibilité au travail, une dizaine de facteurs de risque ont été retenus en 2010 (Code du travail—Article L41261-1 et D41261-1). Ces facteurs se répartissent en trois catégories : « contraintes physiques marquées » ; « environnement physique agressif » ; « rythmes de travail ». Parmi ces dix critères, nous trouvons les « manutentions manuelles de charges », les « postures pénibles » ou encore le « travail répétitif ». Nous observons d'ailleurs que la majorité des standards ou normes propose principalement des seuils de référence pour maîtriser la charge physique en termes de gestes répétitifs, de charges manipulées avec des fréquences rapprochées [28,29]. Cependant, peu de ces standards semblent être adaptés et représentatifs de l'activité de maintenance, mettant ainsi en lumière des activités physiques très variables, non répétitives pouvant même être couplées à des efforts répétés et statiques [30]. Les efforts statiques étant d'ailleurs reconnus comme plus pénalisant à court terme que les efforts répétés [31]. De plus, la littérature dédiée à la santé et à la sécurité au travail en maintenance se focalise généralement sur une sous-activité et non sur l'ensemble de l'activité de maintenance [7,10,32]. Ces travaux étudient d'ailleurs principalement des données non physiologiques, reposant sur la simulation partielle d'une situation de travail avec des résultats souvent qualitatifs. Ces méthodes de travail sont souvent celles utilisées par les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité.

Or, dans de nombreuses situations de travail, la donnée physiologique, voire psychophysiologique s'est révélée souvent indispensable pour comprendre objectivement les réelles difficultés ressenties et subies par les opérateurs. Borel et al., 2007 détaillent l'astreinte cardiaque pour des opérateurs de maintenance de pylônes électriques dont le relevé de fréquence cardiaque a mis en évidence un niveau de pénibilité très élevé [33]. Boudet et al., 2018a expliquent la pertinence de l'étude de l'astreinte cardiaque et de sa prise en compte pour mieux établir l'organisation d'une unité hospitalière. Ainsi, depuis plusieurs années des méthodes et des outils se sont développés pour mesurer l'activité physique notamment à travers l'émergence des capteurs de mesures de la fréquence cardiaque (FC) [34]. D'abord orientée en médecine du sport, la fréquence cardiaque, mesurée par l'intermédiaire d'un cardio fréquencemètre (CFM) est désormais utilisée dans le monde du travail [35]. En effet, la mise en place de ce procédé est rapide, peu invasif et permet d'analyser rapidement des données physiologiques de référence [35,36]. Plus particulièrement, le Coût Cardiaque Relatif (CCR) est très répandu et est considéré comme une méthode « validée scientifiquement, facilement accessible et consensuelle » [37].

Cependant, la mesure de la fréquence cardiaque, pour être fiable dans son interprétation, est sensible à de nombreuses variables parasites. Plusieurs travaux mettent en avant le stress, la prise de repas associée au temps de digestion ou encore la température ambiante [35,38]. Par exemple, dans des conditions de températures ambiantes élevées, le rythme cardiaque va augmenter pour redistribuer les flux sanguins entre le noyau et l'écorce corporelle à des fins de maintenir l'homéothermie, c'est-à-dire l'équilibre entre la température cutanée et une température interne constante proche de 37 °C. Il convient dès lors de bien identifier ces variables parasites pour bien interpréter les données mesurées.

Associée à cette charge physique, la charge mentale (dimension cognitive) joue également un rôle important. Plusieurs travaux mettent en avant le lien étroit entre ces deux dimensions [31,39]. Les travaux de Wisner, 2015, expliquent que « La notion de charge cognitive permet aussi de montrer qu'il n'y a pas d'activités physiques sans activités cognitives, que beaucoup des difficultés du travail physique ont pour origine la négligence des dimensions cognitives du travail » [39]. Cependant, la maintenance, rappelons-le, est souvent une succession de tâches simples ou complexes, ne se ressemblant pas, avec des efforts physiques très variables. Certaines tâches sont donc admises comme complexes d'un point de vue cognitif avec une succession de nombreuses sous-tâches devant faire appel à des capacités de mémoire, d'interprétations pouvant mettre en difficulté les opérateurs. L'étude de Zafiharimalala, & Tricot, 2009, explique d'ailleurs que la documentation décrivant les procédures de maintenance doit être mieux construite pour épauler l'opérateur dans la mémorisation des nombreuses activités qu'il doit mener chaque jour [40].

Objectifs et hypothèse de l'étude

Dans notre étude, nous allons donc nous intéresser à des tâches de maintenance représentatives de celles réalisées le plus fréquemment (hebdomadaire). En tant qu'ingénieur-chercheur (Fabien Bernard, rattaché au laboratoire ELLIADD - E.A. 4661), depuis 5 ans, de très nombreuses tâches de maintenance ont pu être analysées. Ce sont très souvent des tâches simples, avec une charge physique importante pouvant influencer la dimension cognitive. Nous avons, à travers cette approche expérimentale, deux objectifs. Le premier étant de mettre en avant la pénibilité dans le secteur de la maintenance aéronautique des hélicoptères. Le deuxième objectif, associé au premier, doit montrer la nécessité d'une meilleure intégration en maintenabilité des dimensions physiques et cognitives des tâches de maintenance actuellement réalisées. Ainsi, nous pouvons supposer que si ces dimensions sont mieux appréhendées en bureau d'études maintenabilité alors l'activité future de la maintenance sera mieux anticipée et les tâches de maintenance nouvellement conçues demeureront moins pénibles.

Nous pouvons alors émettre l'hypothèse que l'activité de maintenance aéronautique implique des charges physiques et cognitives qu'il est nécessaire, voire indispensable d'anticiper en maintenabilité.

Méthodes et techniques

Afin de vérifier notre hypothèse, nous nous proposons de décrire le protocole d'étude que nous avons retenu en nous appuyant sur la simulation de tâches de maintenance sur maquettes physiques à échelle réelle. Le choix de la maquette physique est justifié dans la mesure où les résultats obtenus pour analyser l'activité au travail sont sans différences significatives avec l'activité réelle, à condition que le niveau de réalisme soit optimal. En nous basant sur de précédents travaux [41], nous avons conçu une maquette en bois à l'échelle, contenant certaines pièces réalisées en impression 3D pour avoir encore plus de réalisme. Le niveau de détails était en effet élevé afin d'assurer une forte validité écologique de la simulation, c'est-à-dire un écart réduit entre l'activité réelle de l'opérateur et l'activité simulée [42]. Ainsi, le niveau de détail a permis à l'opérateur de retrouver ses réels repères visuels, sans différence significative avec la réalité. Pour les pièces manipulées, nous avons reproduit les volumes, les masses, les centres gravités afin d'assurer des comportements sans différence avec la situation réelle [43,44].

Contexte d'études

La maquette physique utilisée pour notre expérimentation concerne le plancher mécanique d'un hélicoptère, lieu où se trouve la motorisation comme l'illustre la Fig. 1 suivante.

Pour accéder au plancher mécanique, une plateforme permet à l'opérateur d'accéder à droite ou à gauche de l'hélicoptère. À partir de cette maquette physique, quatre tâches de maintenance ont été évaluées. Elles ont été sélectionnées pour leur récurrence et leur représentativité par rapport à l'ensemble de la machine en termes de postures, de gestes ou encore d'efforts. Ces tâches, dans



Figure 1. NH90 d'Airbus Helicopters exploité par l'Aviation légère de l'Armée de Terre (ALAT).

leur ensemble, sont pour la plupart réalisées par un seul opérateur, souvent plusieurs fois par semaine lorsqu'il y a plusieurs hélicoptères à maintenir. Également, les tâches réalisées sont souvent indépendantes les unes des autres, et leur ordre d'enchaînement dépend de la disponibilité des outillages ou encore de la présence d'autres opérateurs sur la zone de travail. Lors d'une précédente expérimentation [41], nous avons observé et quantifié ces tâches pour étudier la pertinence des outils de simulation de l'activité du travail, et plus particulièrement la maquette physique pour sa forte valeur écologique lors de simulation de l'activité [42]. Nous avons ainsi quantifié le score RULA (Rapid Upper Limb Assessment) de chacune d'elles au travers de la maquette physique, confortant notre choix de réévaluer ces quatre tâches plus finement, sans interruption et donc dans une séquence représentative du réel. En effet, la tâche 1 est évaluée par un score RULA de 7, signifiant que la zone de travail n'est pas adaptée et nécessite un changement immédiat pour préserver l'opérateur. Les tâches 2, 3 et 4 ont un score de 4 induisant une nécessité de modifier le poste de travail à court terme pour que l'opérateur travaille sans risque. Le Tableau 1 décrit chacune d'elles et la Fig. 2 montre la posture principale de chaque tâche.

Le produit évalué est distribué dans le monde entier et notamment en Europe. L'activité de maintenance est principalement effectuée par des hommes. La sélection des opérateurs a donc été faite selon ces critères de représentativité mais aussi selon leur expérience en termes de savoir et savoir-faire concernant la maintenance sur les systèmes moteurs d'hélicoptères. Cette sélection a été menée en accord avec les contraintes industrielles, les disponibilités des opérateurs, les plannings, les autorisations d'accès à différentes zones sur le site de production etc. Pour que l'expérimentation soit homogène, nous avons également sélectionné des individus ayant une pratique sportive équivalente entre eux [45].

Chacun des sept opérateurs a réalisé les 4 tâches à la suite, comme ils peuvent le faire dans leur travail quotidien. Un dispositif vidéo a également été installé sur la maquette afin d'enregistrer l'ensemble de l'expérience selon différents points de vue afin de pouvoir garder une trace et analyser les comportements des opérateurs à postériori.

Déroulement et analyse

À l'arrivée de chaque opérateur dans la salle où la maquette était installée, chacun a d'abord découvert les tâches à réaliser. Cette condition était importante pour reproduire les conditions du terrain où les opérateurs découvrent les tâches de maintenance souvent le jour même de leur réalisation (les opérateurs exécutent les tâches que le responsable d'atelier détermine en fonction des derniers vols). Avant

Tableau 1 Tâches observées avec mesure du rythme cardiaque des opérateurs.
Observed tasks with measurement of the heart ratio of each operator.

Tâche	Charge (Kg)	Postures principales	Efforts principaux	RULA[a]
1 - Manipulation d'un alternateur sur le moteur	24	Debout, flexion avant du tronc	Statiques sur l'ensemble du corps	7
2 - Vérification aux supports moteurs	0	À genou	Statiques sur les membres inférieurs et le dos/dynamiques sur les membres supérieurs	4
3 - Vérification des prises électriques	0	Debout, flexion avant du tronc	Statiques sur les membres inférieurs et le dos/dynamiques sur les membres supérieurs	4
4 - Vérification à l'actuateur moteur	0	À genou	Statiques sur les membres inférieurs et le dos/dynamiques sur les membres supérieurs	4

[a] RULA : rapid upper limb assessment.



Figure 2. Postures principales de chacune des quatre tâches sélectionnées pour la réalisation de l'expérimentation.

de démarrer l'enchaînement des tâches, les opérateurs ont été équipés du cardio-fréquencemètre (POLAR H10) et sont restés assis cinq minutes afin de relever leur fréquence cardiaque au repos. Les opérateurs ont ensuite enchaîné les quatre tâches. Chaque opérateur a eu à disposition l'ensemble des outillages nécessaires pour réaliser l'ensemble des tâches de maintenance. Pendant la réalisation de chaque tâche, l'opérateur a verbalisé son ressenti physique afin de corréler les mesures enregistrées et sa propre perception. L'observateur a parfois questionné l'opérateur pendant son activité pour uniquement l'inciter à verbaliser son action. Immédiatement à la fin de la dernière tâche, chaque opérateur a rempli le questionnaire de charge mentale, le NASA-TLX, conforme à sa passation [46].

Pour réduire les variables parasites sur le relevé du rythme cardiaque, l'expérimentation a été réalisée dans un bâtiment aux conditions atmosphériques constantes : qualité de l'air optimale (système d'aspiration, de filtration et de renouvellement de l'air), taux d'humidité constant à 50 %, température ambiante constante à 20 °C sur l'ensemble de l'expérimentation et pour tous les opérateurs. Ils ont tous réalisé l'expérimentation au milieu de leur service, 2 heures après la fin du repas (déjeuner).

Le paragraphe qui suit décrit les outils de mesure utilisés pour évaluer le vécu des opérateurs.

Indicateurs et outils d'analyse

Afin d'analyser les deux dimensions (physique et cognitive), nous proposons de déployer les outils et mesures suivantes (Tableau 2) :

- Coût Cardiaque relatif (CCR) : permet d'analyser l'astreinte cardiaque de l'opérateur, en tenant compte de son âge. Par définition, le coût cardiaque se calcule selon l'équation suivante : $\text{CCR}\ (\%) = \frac{\text{FC moyenne au travail} - \text{FC au repos}}{\text{FC max} - \text{FC au repos (réserve cardiaque)}}$.

  La Fig. 3 suivante exprime l'ensemble des données nécessaires au calcul du CCR ;

Tableau 2 Indicateurs ergonomiques retenus, outils de mesure et scores associés.
Ergonomic indicators, measurement tools and scores associated.

Dimension du travail	Indicateurs retenus	Outils de mesures	Données/Mesures relevées	Unités
Composante physique	Coût Cardiaque Relatif	Cardio-fréquencemètre (Polar V10, enregistrement toutes les secondes)	Echelle de Frimat	%
	Indice Delta FC (λFC)		≥ 20	b.min-1
Composante cognitive	Charge mentale	NASA-TLX	Score sur une échelle de 0 à 100	SD

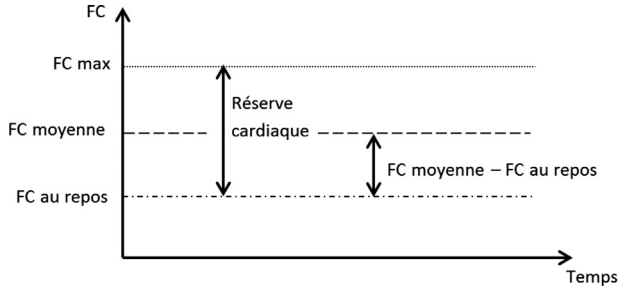


Figure 3. Schématisation des données nécessaires au calcul du Coût Cardiaque Relatif (CCR).

Nous proposons de nous appuyer sur l'échelle de Frimat, 1989, qui permet de qualifier l'activité cardiaque en fonction du score du CCR, considérant qu'à partir de 20 % le travail est contraignant [47]. La Fig. 4 suivante détaille cette échelle ;

- Indice Delta FC (λFC) : se mesure en calculant la différence entre la fréquence cardiaque maximale en activité et la fréquence cardiaque moyenne de l'activité étudiée. Un λFC supérieur à 20 b.min^{-1} correspond à un effort dont la pénibilité est considérée comme notable, et lorsqu'elle dépasse 30 b.min^{-1}, elle devient excessive [48] ;
- Le NASA-TLX [46] : méthode d'évaluation subjective de la charge mentale de travail, s'appuyant sur six dimensions scorées de 0 à 100 : exigence mentale, exigence physique, exigence temporelle, performance personnelle, frustration et effort. Elle permet d'obtenir un score global noté de 0 à 100 permettant de préciser si l'opérateur se trouve en sous-charge (≤ 30) ou en surcharge mentale de travail (≥ 70).

Analyse

Le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis (H-test) a été utilisé pour comparer le CCR en fonction des opérateurs et des tâches. Le test non-paramétrique de Friedman a été utilisé pour comparer la fréquence cardiaque de chaque individu pour chacune des tâches. Enfin, pour comparer chacun des scores du NASA-TLX en fonction des opérateurs, nous avons utilisé le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis. Nos résultats sont considérés comme statistiquement significatif si la valeur « p » est strictement inférieure à 5 % ($p < 0{,}05$).

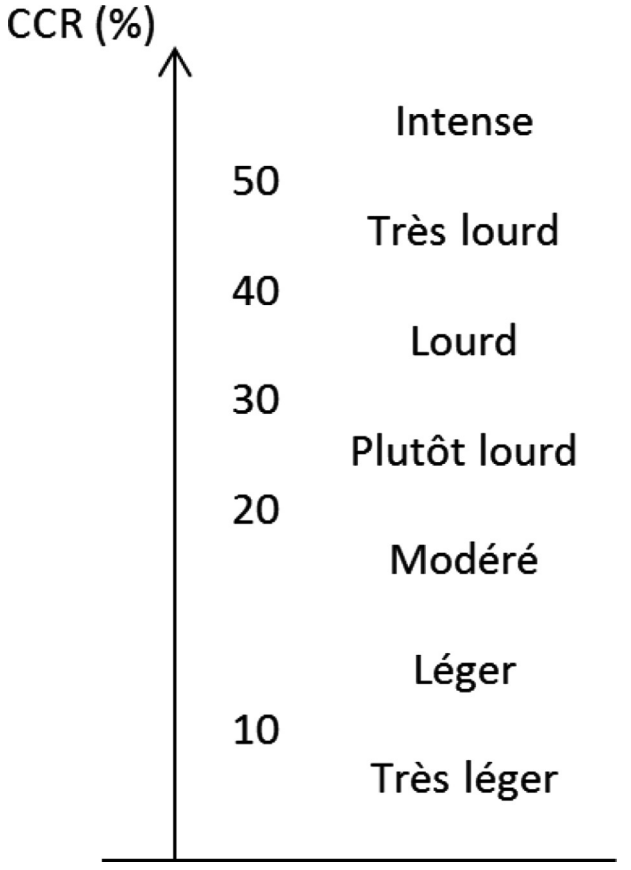


Figure 4. Limites d'astreinte cardiaque à travers la mesure du Coût Cardiaque Relatif (CCR), échelle de Frimat (1989).

Résultats

Caractéristiques des participants

Les opérateurs sélectionnés sont tous des hommes avec une moyenne d'âge de 36,7 (± 8,2) années. Ils ont tous une pratique sportive considérée comme « loisir-modérée » selon les critères de l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) [45]. Sur les sept opérateurs, seul un est un fumeur. Le Tableau 3 suivant résume les caractéristiques biométriques des opérateurs retenus.

Tableau 3 Caractéristiques biométriques des opérateurs retenus pour l'expérimentation.
Biometric characteristics of operators.

	Stature (m)	Âge (années)	Masse (Kg)	Fumeur (N/A)	Pratique sportive (N/A)
Opérateur 1	1,85	38	92	Non	Loisir-modéré
Opérateur 2	1,83	39	74		
Opérateur 3	1,80	49	65		
Opérateur 4	1,80	29	80		
Opérateur 5	1,78	24	67		
Opérateur 6	1,72	32	65		
Opérateur 7	1,70	29	66	Oui	
Moyenne	1,78	36,7	72	—	
Écart-Type	0,05	8,2	10,2	—	

Généralités

Le temps moyen d'exécution des quatre tâches est de 725 (± 12,6) secondes, équivalent à environ 12 minutes. En détail, la tâche 1 dure : 302,4 (± 10,6) secondes, la tâche 2 : 120,4 (± 5,9) secondes, la tâche 3 : 180,6 (± 9,5) secondes et la tâche 4 : 121,9 (± 8,1) secondes. Le temps de repos, en position assis, d'une durée de 300 secondes (5 minutes) a été parfaitement respecté par l'ensemble des sept opérateurs permettant ainsi d'avoir un T initial commun au démarrage de la première tâche. Le Tableau 4 résume ces premiers résultats.

Charge physique

Le Tableau 5 présente les résultats dans leur ensemble, avec la fréquence cardiaque moyenne, au repos, maximal, ainsi que le CCR et λFC. Au regard de l'échelle de Frimat, 1989, le CCR moyen (32,6 % ± 8,6 %) se situe entre la catégorie « plutôt lourd » à « lourd ». Au regard de l'écart type, le CCR peut tendre vers le « plutôt lourd » ou vers le « très lourd » suivant les individus. Nous pouvons noter également que le λFC conforte les résultats du CCR. Il est en moyenne supérieur à la valeur acceptable de 20 $b.min^{-1}$ avec 24,6 ±7,0 $b.min^{-1}$, dans la catégorie « pénibilité notable », excepté pour les opérateurs 3 et 6 qui rentrent la catégorie « pénibilité excessive ».

En détail, si nous distinguons les CCR en fonction des opérateurs, il ressort de façon significative ($f(6) = 3,28$; $p \leq .05$) des différences entre les opérateurs. Les opérateurs 3 et 7 présentent les valeurs les plus élevées avec une moyenne de 44,3 % (± 0,1 %) alors que l'opérateur 5 présente le CCR le plus bas de 21,2 %. La Fig. 5 illustre ce résultat.

La Fig. 6 introduit ainsi le tracé de la fréquence cardiaque pour les trois groupes d'opérateurs déterminés en fonction de leur CCR. Pour chacune des tâches, le test de Friedman montre une différence significative entre les trois fréquences cardiaques. Cette différence est plus marquée pour les tâches 1 ($f(2) = 9,31$; $p \leq .001$) et 2 ($f(2) = 9,02$; $p \leq .001$) et 3 ($f(2) = 8,42$; $p \leq .01$) que pour la dernière tâche 4 ($f(2) = 7,22$; $p \leq .05$). Pour la phase de repos nous notons également une différence significative entre les trois fréquences cardiaques ($f(2) = 12,13$; $p \leq .05$). En détail, la fréquence cardiaque la plus faible correspond à l'opérateur 5 qui est le plus jeune du groupe (24 ans). Le tracé le plus élevé correspond d'une part à l'opérateur le plus âgé (49 ans) mais également au seul opérateur fumeur du groupe alors que celui-ci a 29 ans. Le groupe d'opérateurs avec la fréquence cardiaque intermédiaire a un âge moyen de 34,5 années (± 4,8 années). La Fig. 6 montre les résultats.

Les résultats étant significatifs, nous proposons une comparaison multiple par paires entre les quatre tâches pour comparer les fréquences cardiaques. Cette comparaison a été effectuée pour chacun des trois groupes d'opérateurs. Une différence significative apparaît uniquement pour le groupe d'opérateurs 3, 7 entre la tâche 4 et les tâches 1, 2 et 3. Le Tableau 6 détaille les résultats :

Maintenant, tous sujets confondus, le CCR moyen (%) ne montre pas de différences significatives en fonction des tâches. Nous remarquons néanmoins que la tâche 2 présente le CCR le plus élevé (39,3 ± 14,5) alors que la tâche 1 est la plus physiquement contraignante, avec un effort statique important. La tâche 4 montre le CCR le plus bas (26,7 ± 5,7). Le Tableau 7 détaille les résultats.

Charge mentale

Le NASA-TLX a été rempli par chaque opérateur à la fin de l'enchaînement des quatre tâches. Toutes tâches confondues, aucune différence significative n'a été relevée (H-test, $p > .05$, NS) entre les sept opérateurs pour chacun des six critères notés à travers le NASA-TLX. La moyenne globale est de 49,2 (± 5,9), indiquant ainsi une charge mentale dans la moyenne, entre la sous-charge et la surcharge mentale. En revanche, nous notons des scores élevés, quel que soit l'opérateur, pour les catégories de charge physique et d'effort, respectivement de 86,4 (± 8,5) et de 79,3 (± 7,9). Le Tableau 8 présente les résultats.

Verbalisation

La verbalisation de chaque opérateur a mis en évidence, de manière unanime, que la tâche 1 a été la plus difficile physiquement, avec des comportements « irrités », avec l'envie de finir très rapidement la tâche. Plus précisément, quatre opérateurs sur sept ont, pendant la réalisation de la tâche 1, exprimé l'apparition de douleurs au niveau dorso-lombaires. Les tâches 2, 3 et 4 n'ont pas, quant à elles, entraîné de douleurs mais des gênes, toujours au niveau des lombaires. Ces remarques sur les gênes étaient de moins

Tableau 4 Temps de repos moyen et temps d'exécution moyen pour chacune des tâches de maintenance.
Mean of time break and mean of time execution for each maintenance tasks.

	Temps de repos moyen (secondes) (ET)	Temps d'exécution moyen (secondes) (ET)
Tâche 1	300 (± 0,0)	302,4 (± 10,6)
Tâche 2	300 (± 0,0)	120,4 (± 5,9)
Tâche 3	300 (± 0,0)	180,6 (± 9,5)
Tâche 4	300 (± 0,0)	121,9 (± 8,1)

Tableau 5 Caractéristiques biométriques des opérateurs mesurées pendant l'expérimentation : Fréquence Cardiaque (FC) moyenne, au repos, maximal ; Coût Cardiaque Relatif (CCR) et l'indice Delta FC (λFC).
Biometric characteristics of operators measured during the experimentation, mean heart ratio, resting heart ration, relative cardiac impact and Delta indicator of hear ratio.

	FC moyenne (b.min-0)	FC repos (b.min-1)	FC max (b.min-1)	CCR (%)	λFC (b.min-1)
Opérateur 1	99	79	182	29,4	15,8
Opérateur 2	96	74	181	31,9	21,8
Opérateur 3	107	72	175	44,1	35,5
Opérateur 4	89	67	188	28,4	19,8
Opérateur 5	86	68	191	21,2	22,0
Opérateur 6	111	88	186	28,4	32,3
Opérateur 7	104	71	181	44,4	25,0
Moyenne (ET)	98,9 (± 9,2)	74,1 (± 7,3)	183,4 (± 5,1)	32,6 (± 8,6)	24,6 (± 7,0)

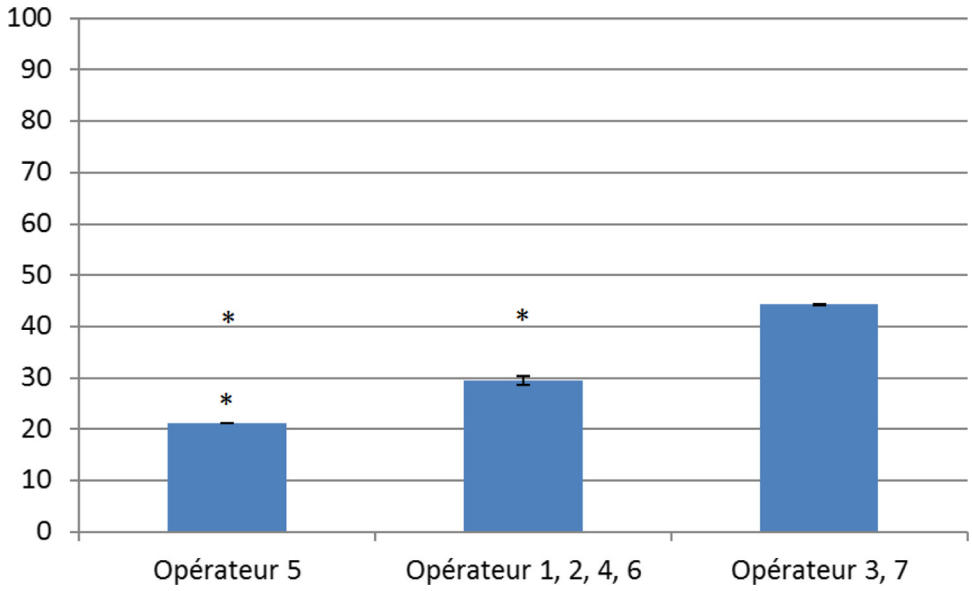


Figure 5. Répartition des opérateurs en fonction du Coût Cardiaque Relatif (CCR), toutes tâches confondues (* : $p \leq .05$).

Tableau 6 Comparaison multiple par paires entre les fréquences cardiaques des quatre tâches de maintenance pour le groupe d'opérateurs 3, 7.
Pairwise multiple comparison of heart rates of the four maintenance tasks for operator 3, 7.

	Tâche 1	Tâche 2	Tâche 3	Tâche 4
Tâche 1	/	F(3) = 6,21 ; $p > 0,05$	F(3) = 5,14 ; $p > 0,05$	F(3) = 3,19 ; $p < 0,01$
Tâche 2	F(3) = 6,21 ; $p > 0,05$	/	F(3) = 4,51 ; $p > 0,05$	F(3) = 4,02 ; $p < 0,01$
Tâche 3	F(3) = 5,14 ; $p > 0,05$	F(3) = 4,51 ; $p > 0,05$	/	F(3) = 2,48 ; < 0,05
Tâche 4	F(3) = 3,19 ; $p < 0,01$	F(3) = 4,02 ; $p < 0,01$	F(3) = 2,48 ; < 0,05	/

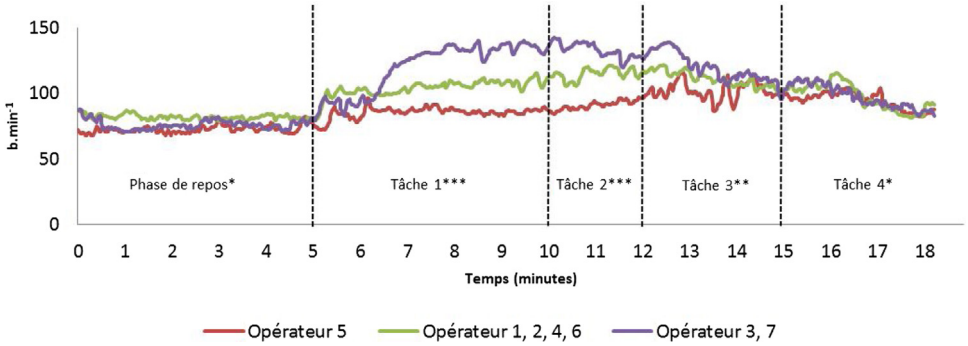


Figure 6. Comparaison de la fréquence cardiaque des trois groupes d'opérateurs (5 - 1, 2, 4, 6 - 3, 7) en fonction des cinq séquences de l'expérimentation (Friedman * : $p \leq .05$; ** : $p \leq .01$; *** : $p \leq .001$).

Tableau 7 Tous sujets confondus, aucune différence significative n'a été relevée (H-test, $p > .05$, NS) entre chacune des tâche en fonction du score du CCR.
All subjects combined, no significant difference was noted (H-test, $p > .05$, NS) between each task according to the relative cardiac impact score.

	Tâche 1 (%)	Tâche 2 (%)	Tâche 3 (%)	Tâche 4 (%)
Opérateur 1	25,3	35,0	30,1	27,2
Opérateur 2	20,5	41,9	34,5	30,7
Opérateur 3	56,2	61,1	37,8	21,3
Opérateur 4	22,4	29,9	34,0	27,4
Opérateur 5	13,9	18,8	27,7	24,5
Opérateur 6	33,8	33,8	26,6	19,5
Opérateur 7	35,4	54,4	51,7	36,3
Moyenne (ET)	29,6 (± 13,9)	39,3 (± 14,5)	34,6 (± 8,5)	26,7 (± 5,7)

Tableau 8 Toutes tâches confondues, aucune différence significative n'a été relevée (H-test, $p > .05$, NS) entre les sept opérateurs, et ce pour l'ensemble des 6 critères et du score général du NASA-TLX.
All tasks combined, no significant difference was noted (H-test, $p > .05$, NS) between each operator, and those for all 6 criteria and the general score of NASA-TLX.

	Opérateur							
	1	2	3	4	5	6	7	Moyenne (ET)
Exigence mentale	15	15	10	20	10	20	15	15,0 (± 4,1)
Exigence physique	80	95	100	85	85	75	85	86,4 (± 8,5)
Exigence temporelle	10	10	5	25	30	5	20	15,0 (± 10,0)
Performance	10	5	5	15	10	5	5	7,9 (± 3,9)
Effort	80	80	65	90	85	80	75	79,3 (± 7,9)
Frustration	15	10	10	5	20	5	35	14,3 (± 10,6)
Total	48	51,3	49,6	52,7	57,6	38,6	46,7	49,2 (± 5,9)

en moins nombreuses en progressant de la tâche 2 à la tâche 4 pour l'ensemble des opérateurs, excepté le plus grand avec, rappelons-le une stature de 1,85 m. Ce dernier a exprimé une gêne constante lors de chaque flexion du dos jusqu'à la fin de l'expérimentation.

Discussion

L'objectif de cette étude est double. D'une part, nous souhaitons montrer la pénibilité des tâches de maintenance dans le secteur de la maintenance aéronautique et plus particulièrement dans celui des hélicoptères. D'autre part, nous souhaitons mettre en avant, en lien avec le premier objectif et sur la base de la littérature scientifique, la nécessité de mieux prendre en compte dans les phases de conception les dimensions physiques et cognitives des tâches de maintenance définies.

Nos résultats montrent, dans un premier temps, sur l'ensemble des quatre tâches et tous opérateurs confondus, que l'astreinte cardiaque est élevée, considérée de « plutôt lourde » à « lourde » selon l'échelle de Frimat, 1989 [47]. Ainsi, l'activité de maintenance est considérée comme physiquement pénible, en cohérence avec de nombreuses observations et travaux de recherche. Les travaux de Borel et al., 2007 détaillent la pénibilité des agents réalisant

la maintenance des pylônes électriques [33] ; Giovanelli, & Touchard, 2018, détaillent la pénibilité et la nécessité d'assister les opérateurs par des exosquelettes pour certaines tâches de maintenance des trains [49] ; ou encore les travaux de Fajardo, & Ortiz, 2016, détaillent les risques de la région lombaire pour les opérateurs de maintenance des avions [50].

En détail, nos résultats statistiques montrent des différences significatives entre les opérateurs, notamment au regard du CCR. Il ressort trois groupes distincts d'opérateurs. Le premier groupe concerne un seul opérateur avec le CCR le plus bas, 21,2 %, signifiant, selon l'échelle de Frimat une astreinte cardiaque entre « modérée » à « plutôt lourde ». Le second groupe, composé des opérateurs 1, 2, 4 et 6 a un CCR moyen de 29,5 % (±1,7) définissant une astreinte cardiaque « plutôt lourde ». Le denier groupe, composé des opérateurs 3 et 7 présente le CCR le plus élevé, 44,3 % (±0,1 %), induisant une astreinte cardiaque « lourde ». Le dénominateur commun à ces trois groupes semble être l'âge. En effet, le CCR le plus bas concerne l'opérateur le plus jeune, âgé de 24 ans. Le second groupe concerne quatre opérateurs avec une moyenne de 34,5 années (±4,8 années). Le dernier groupe concerne l'opérateur le plus âgé (49 ans) mais aussi le seul opérateur fumeur de notre population étudiée. Il est cohérent, d'une part, d'observer un CCR qui augmente avec l'âge, puisque cette donnée dépend de la fréquence cardiaque maximale théorique qui elle-même dépend de l'âge. D'autre part, être fumeur est un facteur aggravant et peut expliquer l'accroissement plus rapide et plus élevé de la fréquence cardiaque lors de l'effort [51]. Surtout, nous pouvons noter que, quel que soit l'âge de l'opérateur, la charge physique est au-dessus de la moyenne avec une astreinte physique et un indice Delta FC élevé, au-dessus du seuil dit de « pénibilité acceptable » [47,48].

Nous avons également observé la charge physique tâche par tâche. Tout d'abord, nous avons réalisé le test de Friedman comparant la fréquence cardiaque de nos trois groupes d'opérateurs précédents. Le test montre des écarts très significatifs quelle que soit la tâche mais qui tendent à diminuer progressivement entre la tâche 1 (celle avec effort statique) et les trois tâches qui suivent, sans effort spécifique mais uniquement avec des postures complexes. La baisse de la fréquence est donc cohérente puisque les tâches 2, 3 et 4 sont plus faciles physiquement que la tâche 1. Cependant, pour chacune des tâches, le CCR est supérieur au seuil de pénibilité acceptable. Également, tous opérateurs confondus, nous n'avons pas observé de différences significatives entre le CCR de chaque tâche. Nous pouvons également observer que le CCR moyen est plus élevé en tâches 2 et 3 que pour la tâche 1 alors que cette dernière est la plus pénible physiquement (port de charge, effort statique prolongé, posture dégradée...). Nous pouvons expliquer ce phénomène d'une part à cause du manque de récupération des opérateurs, et donc l'absence de pause, entre les tâches et d'autre part, par la posture adoptée en tâche 2 (à genoux et flexion à 90° du tronc) qui entretient une fréquence cardiaque plus élevée que la fréquence cardiaque au repos. Ces deux facteurs combinés entraînent une légère augmentation de la fréquence cardiaque au début de la tâche 2 avant une diminution lente qui se poursuit sur les tâches 3 et 4. Notre étude montre donc la nécessité de mieux organiser les séquences de maintenance en fonction de leurs difficultés physiques. Les tâches de maintenance doivent pouvoir être sélectionnées en fonction de leurs difficultés pour alterner des tâches difficiles et moins difficiles. Également, la variabilité et la diversité motrice des gestes peuvent être étudiées pour s'affranchir de mouvements similaires entre des tâches différentes [52]. L'enjeu est triple : préserver l'opérateur, sa sécurité et assurer une productivité efficace. Au-delà d'une organisation spécifique du séquencement des tâches dépendant de leurs difficultés, nous pouvons recommander la mise en place de pauses au sein ou entre certaines tâches afin d'assurer un certain niveau de récupération physique. Ces pauses doivent pouvoir être adaptées en fonction de l'effort physique et de la durée d'exposition. Ainsi, afin d'assurer une récupération efficace il convient d'abord d'impacter la conception de la tâche de maintenance. Par exemple, en concevant l'environnement de travail pour permettre aux opérateurs d'avoir des temps de repos (sièges, confort thermique, point d'eau...) ou encore s'assurer que la fréquence des actions techniques soient conformes aux normes. Il s'agit aussi de spécifier les meilleures conditions pour effectuer ce repos pendant l'activité : posture (assis, debout...), temps de pause et boisson [53]. Dès lors, nous pouvons émettre une recommandation : insérer dans les procédures de maintenance, conçues en maintenabilité, les périodes de repos préconisées faisant suite à des activités de maintenance identifiées comme physiquement pénibles. Cette recommandation se fonde sur le constat de l'étude de Zafiharimalala, & Tricot, 2009, suggérant des procédures de maintenance plus claires et surtout adaptées à l'activité réelle [40]. Cependant, au-delà d'un environnement de travail adapté et de procédures guidant l'opérateur, l'organisation du travail doit permettre à l'opérateur de réguler temporellement son activité lorsqu'il en ressentira le besoin [53].

Enfin, sur la base de nos résultats, l'évaluation de la charge mentale ne montre pas de différences significatives entre les opérateurs. Cette évaluation n'a été effectuée qu'à la fin de l'enchaînement des quatre tâches pour ne pas perturber les opérateurs pendant la simulation. En effet, le score global moyen du NASA-TLX est parfaitement dans la moyenne d'une charge cognitive classique, ne supposant donc pas de surcharge ou de sous-charge [46]. En revanche, l'analyse détaillée des scores, qui eux-mêmes ne présentent pas de différences significatives entre les opérateurs, permet de nuancer le score global. Tout d'abord, le score pour les catégories « exigence physique » et « effort » est très élevé, en cohérence avec l'analyse de la fréquence cardiaque ci-dessus. En revanche, la catégorie « exigence mentale » présente un score très faible inclus dans la catégorie « sous-charge mentale ». Ce score est également cohérent avec le choix de nos tâches initiales, toutes extrêmement simples, courtes, appelant un savoir et un savoir-faire de base, sans usage d'outils spécifiques, sans mémorisation de séquences longues et complexes. Dès lors, nous pouvons supposer que le score global de la charge mentale a été principalement influencé par la charge physique. Le lien entre charge physique et charge mentale est donc établi dans notre situation de travail. Cependant, contrairement à certains travaux expliquant « que beaucoup des

difficultés du travail physique ont pour origine la négligence des dimensions cognitives du travail » [39], notre cas d'études, bien spécifique à la maintenance aéronautique, tend à nuancer ces propos. C'est bien la charge physique qui vient influencer la charge mentale (dimension cognitive). D'ailleurs, l'irritation psychologique ressentie et verbalisée par les opérateurs, incitant à terminer au plus vite la tâche, semble être principalement due à la charge physique entraînant des douleurs clairement exprimées.

Si nous nous plaçons dans un contexte de bureau d'études, et plus particulièrement en maintenabilité, la donnée physiologique est d'autant plus essentielle qu'elle peut jouer le rôle « d'électrochoc » auprès d'une population qui a un rôle prépondérant dans la conception de produits, dont l'usage futur est souvent mal compris. En effet, une des grandes problématiques dans la conception de produits/systèmes centrée sur l'humain—conception anthropocentrée [54]—est le manque de compromis entre les critères mécaniques et les critères ergonomiques. Plusieurs travaux expliquent ce manque de compromis. Premièrement, nous observons un manque de connaissances dans cette discipline, un manque de temps en bureau d'études pour comprendre les usages et les caractéristiques humaines en lien avec le développement d'un futur produit/système [23]. Ce manque de connaissances touche aussi bien la connaissance stricte de la discipline de l'ergonomie mais également les outils de mesures qui y sont dédiés. Plusieurs travaux montrent, par exemple, qu'il existe pourtant des outils d'analyse communs entre concepteurs et ergonomes tels que les outils de simulation, qu'ils soient digitaux (mannequin numérique, réalité virtuelle) ou physiques (maquette physique comme celle exploitée pour notre expérimentation) [24,25,41]. Deuxièmement, pour que la connaissance en ergonomie se pérennise en bureaux d'études il faut convaincre les concepteurs de sa nécessité. Des travaux montrent un changement de comportement dans certains bureaux d'études orientés sur la conception de postes de travail pour la maintenance, tous secteurs confondus avec une prise de conscience clairement établie : 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 [55—57]. Cependant, en aéronautique, le poste de travail est changeant, pour un même opérateur, puisque la zone de travail peut se situer partout, en dehors ou dans l'hélicoptère. C'est pourquoi nous parlons davantage de conception de l'activité de maintenance, qui fait appel à plusieurs postes de travail, à des procédures différentes, des outillages différents... Cette complexité devra davantage s'appuyer sur des données objectives telles que celles touchant la charge physique et mentale. Cette objectivité doit pouvoir être mieux exprimée auprès des concepteurs, sous forme, par exemple, d'un travail de pédagogie et de formations. Ce travail doit être conduit sous l'aval d'un spécialiste en ergonomie, présent au sein même du bureau d'études pour diffuser, guider et contrôler le savoir et savoir-faire en ergonomie. La formation doit apporter aux concepteurs des notions touchant le fonctionnement humain et l'activité de travail. Cette formation, voire cette sensibilisation des concepteurs, ne doit pas se substituer à l'expertise du spécialiste en ergonomie. Le concepteur aura en revanche la capacité de faire des choix conceptuels qui ont du sens pour le futur utilisateur et saura prendre la décision de faire appel à un spécialiste en ergonomie pour rentrer dans le détail. Cet accompagnement est à conduire pour convaincre de l'utilité de l'approche de l'ergonomie au sein des bureaux d'études. D'ailleurs, des recherches ont estimé que l'analyse ergonomique est en soi un acte pédagogique [58]. 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 [59].

Notre étude a été réalisée dans le contexte industriel d'un grand constructeur mondial d'hélicoptères. Nous avons donc dû adapter notre protocole à ce contexte et aux contraintes induites. Dans le temps qui nous a été accordé, nous avons analysé quatre tâches. Ce faible nombre peut représenter un biais expérimental, néanmoins, leur sélection a permis de choisir quatre tâches parfaitement représentatives des tâches réalisées très régulièrement sur ce type de système. Les résultats obtenus permettent, de plus, d'être confortés par la littérature assurant ainsi une cohérence dans l'analyse menée. Il conviendra néanmoins de porter cette analyse sur une plus grande série de tâches pour assurer une analyse de l'activité physique dans des temps d'exécution plus longs et des tâches de maintenance plus variées. Également, ces mêmes contraintes industrielles nous ont imposé de déployer des méthodes d'analyses et des outils associés simples et rapides à mettre en œuvre pour éviter un temps « d'immobilisation » trop long des opérateurs.

Conclusion

L'analyse des dimensions physiques et cognitives de quatre tâches de maintenance récurrentes sur hélicoptère a mis en évidence qu'une prise en compte de ces deux composantes de pénibilité au travail est nécessaire voire indispensable. Plus particulièrement, la mesure de la fréquence cardiaque a mis en avant des Coûts Cardiaques Relatifs très élevés sur des tâches définies initialement comme sans effort physique. Ce constat s'explique par l'organisation de la maintenance qui impose d'enchaîner des tâches physiquement pénibles et des tâches sans contrainte physique particulière. L'inertie cardiaque demeure réelle dans un tel contexte, entretenant ainsi des fréquences élevées même lorsque la tâche ne présente pas de difficultés autour de la dimension physique. Il semble donc essentiel d'anticiper l'activité de maintenance pour mieux la concevoir. Par exemple, en introduisant des temps de pause directement dans les procédures incluant des tâches préalablement définies comme physiquement pénibles. Ainsi, la conception de la maintenance, menée en bureau d'études au travers du département maintenabilité, doit mieux prendre en compte les dimensions physiques et cognitives des tâches définies. Pour se faire, nous proposons, à travers des analyses ergonomiques quantitatives et des formations, de montrer aux concepteurs l'impact de l'activité de maintenance sur

l'opérateur. Les concepteurs seront ainsi mieux sensibilisés aux contraintes réelles subies par les opérateurs de maintenance et sauront ainsi mieux comprendre les conséquences de leurs choix de conception.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des participants ayant aidé à la mise en place des tests et à leur réalisation. La recherche produisant ces résultats a été financée par Airbus, division « Helicopters ».

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

[1] Kinnison HA, Siddiqui T. Aviation maintenance management. London: McGraw-Hill Education; 2012.
[2] Misra KB. Maintenance engineering and maintainability: An introduction. In: Handbook of performability engineering. London: Springer; 2008. p. 755—72, http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84800-131-2_46.
[3] Glade M. Modélisation des coûts de cycle de vie: prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité: Application à l'aéronautique. Doctoral dissertation. Ecully: École centrale de Lyon; 2005.
[4] Bataille C, Galley R. Rapport sur l'aval du cycle nucléaire. Députés 2000.
[5] Virovac D, Domitrović A, Bazijanac E. The influence of human factor in aircraft maintenance. Promet-Traffic&Transportation 2017;29(3):257—66, http://dx.doi.org/10.7307/ptt.v29i3.2068.
[6] AFNOR. NF EN 13306: Maintenance - Terminologie de la maintenance (Norme); 2018.
[7] Chang YH, Wang YC. Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians. Safety science 2010;48(1):54—62, http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2009.05.004.
[8] Latorella KA, Prabhu PV. A review of human error in aviation maintenance and inspection. International Journal of Industrial Ergonomics 2000;26(2):133—61, http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00063-3.
[9] 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.
[10] Di Gironimo G, Monacelli G, Patalano S. 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; 2004.
[11] Hobbs A, Williamson A. Associations between errors and contributing factors in aircraft maintenance. Human factors 2003;45(2):186—201, http://dx.doi.org/10.1518/hfes.45.2.186.27244.
[12] European Agency for safety and Health at work. Safe maintenance in practice. Luxembourg: Publications Offices of the European Union; 2010. p. 102.
[13] Saleh JH, Ray AT, Zhang KS, et al. Maintenance and inspection as risk factors in helicopter accidents: Analysis and recommendations. PloS one 2019;14(2), http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0211424.
[14] Dhillon BS, Liu Y. Human error in maintenance: a review. Journal of Quality in Maintenance Engineering 2006;12(1):21—36, http://dx.doi.org/10.1108/13552510610654510.
[15] Fleischer J, Weismann U, Niggeschmidt S. Calculation and optimisation model for costs and effects of availability relevant service elements. Proceedings of LCE 2006:675—80.
[16] Carlile PR. Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries. Organization science 2004;15(5):555—68.
[17] Shanmugam A, Robert TP. Human factors engineering in aircraft maintenance: a review. Journal of Quality in Maintenance Engineering 2015;21(4):478—505.
[18] AFNOR. NF EN13303: Maintenance - Terminologie de la maintenance (Norme); 2010.
[19] AFNOR. NF EN 15341: Maintenance - Indicateurs de performances clés pour la maintenance (Norme); 2017.
[20] Berrah L. L'indicateur de performance: Concepts et Applications. Cépadues-Editions; 2002.
[21] De Leon PM, Díaz VGP, Martinez LB, et al. A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes. Reliability Engineering & System Safety 2012;100:84—92, http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2011.12.018.
[22] IEA I. What is Ergonomics-Definition and Domains of Ergonomics. In: Johnson WB, Sian IB, Watson J, editors. Measuring the impact of human factors interventions (No. 2000-01-2091). SAE Technical Paper; 2000.
[23] Broberg O. Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 2007;17(4):353—66, http://dx.doi.org/10.1002/hfm.20081.
[24] Kaljun J, Dolšak B. Ergonomic design knowledge built in the intelligent decision support system International. Journal of Industrial Ergonomics 2012;42:162—70, http://dx.doi.org/10.1016/j.ergon.2011.11.009.
[25] Bernard F, Zare M, Sagot JC, et al. Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 2019;29(4):350—60, http://dx.doi.org/10.1002/hfm.20792.
[26] Regazzoni D, Rizzi C. Digital Human Models and Virtual Ergonomics to Improve Maintainability. Computer-Aided Design and Applications 2014;11(1):10—9, http://dx.doi.org/10.1080/16864360.2013.834130.
[27] Lhuilier D. L'invisibilité du travail réel et l'opacité des liens santé-travail. Sciences sociales et santé 2010;28(2):31—63, http://dx.doi.org/10.3917/sss.282.0031.
[28] AFNOR. 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); 2008.
[29] AFNOR. NF X35-109 : Ergonomie - Manutention manuelle de charge pour soulever, déplacer et pousser/tirer - Méthodologie d'analyse et valeurs seuils (Norme); 2011.
[30] Klussmann A, Steinberg U, Liebers F, et al. 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 2010;11(1):272, http://dx.doi.org/10.1186/1471-2474-11-272.
[31] Mehta RK, Agnew MJ. Influence of mental workload on muscle endurance, fatigue, and recovery during intermittent static work. European journal of applied physiology 2012;112(8):2891—902, http://dx.doi.org/10.1007/s00421-011-2264-x.
[32] Yu F, Xue Q, Liu M. Virtual human motion design and ergonomics analysis in maintenance simulation. In: Advances in Applied

Digital Human Modeling and Simulation. Cham: Springer; 2017. p. 65—74.
[33] Borel P, Mageau E, Mignot G. Astreinte cardiaque chez les techniciens de maintenance d'antennes relais de radiotéléphonie mobile. CAMIP 2007:13—8.
[34] Boudet G, Roussel C, Chamoux A, et al. L'astreinte cardiaque pour valider des choix organisationnels. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 2018;79(3):284—5, http://dx.doi.org/10.1016/j.admp.2018.03.155.
[35] Meyer J. La fréquence cardiaque, un indice d'astreinte physique ancien servi par une métrologie moderne. INRS Documents pour le médecin du travail TL 1996;20(8).
[36] Malchaire J. Méthodologie générale d'interprétation des enregistrements continus de fréquence cardiaque aux postes de travail. Cah Med Trav 1988;25(4):181—6.
[37] Boudet G, Chamoux A, Dutheil F. L'astreinte cardiaque est individuelle et doit être évaluée. Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement 2018;79(3):334, http://dx.doi.org/10.1016/j.admp.2018.03.273.
[38] Robert L, Turpin-Legendre E, Shettle J, et al. Travailler dans une ambiance thermique chaude. Références en santé au travail. INRS 2019;N158:31—58.
[39] Wisner A. Ergonomie et psychopathologie du travail. Travailler 2015;(2):31—43, http://dx.doi.org/10.3917/trav.034.0031.
[40] Zafiharimalala H, Tricot A. Vers une prise en compte de l'utilisateur dans la conception de documents en maintenance aéronautique. Actes 2009 [PeCUSI09.63].
[41] Bernard F, Zare M, Sagot J-C, et al. Using Digital and Physical Simulation to Focus on Human Factors and Ergonomics in Aviation Maintainability. Human Factors 2020;62(1):37—54, http://dx.doi.org/10.1177/0018720819861496.
[42] Bayramzadeh S, Joseph A, Allison D, et al. Using an integrative mock-up simulation approach for evidence-based evaluation of operating room design prototypes. Applied ergonomics 2018;70:288—99, http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.011.
[43] Das B, Sengupta AK. Industrial workstation design: a systematic ergonomics approach. Applied Ergonomics 1996;27(3):157—63.
[44] Boy GA. From Rigid to Flexible—From Virtual to Tangible an Evolution of Human-Centered Design. In: Congress of the International Ergonomics Association. Cham: Springer; 2018. p. 54—63, http://dx.doi.org/10.1017/dsj.2017.8.
[45] Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES). Rapport « Révisions des repères relatifs à l'activité physique et à la sédentarité ». Rapport N°2012-SA-0155; 2016.
[46] Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. Advances in psychology 1988;52:139—83.
[47] Frimat P, Chamoux A, De Gaudemaris R, et al. Fréquence cardiaque et travail. Quelle utilisation 1989:357—60.
[48] Meunier P. Protocole pratique de mesurage et d'analyse cardiofréquencemétrique. Cahiers de Médecine Interprofessionnelle (CAMIP) 1997;3:287—93.
[49] Giovanelli Y, Touchard V. Prise en compte du management des risques dans la conception et l'intégration de nouvelles technologies d'assistance physique. 21e Congrès de Maîtrise des Risques et Sûreté de Fonctionnement; 2018.
[50] Fajardo Rodriguez HA, Ortiz Mayorga VA. Characterization of low back pain in pilots and maintenance technicians on a commercial airline. Aerospace medicine and human performance 2016;87(9):795—9, http://dx.doi.org/10.3357/AMHP.4384.2016.
[51] Dalkou S, Clair C. Tabagisme, vapotage et risque cardiovasculaire : mise au point. Rev Med Suisse 2017;13:1186—90.
[52] Lémonie Y. Des marges de manœuvre à la diversité et à la variabilité motrice dans la prévention des TMS. Le travail humain 2019;82(1):67—97, http://dx.doi.org/10.3917/th.821.0067.
[53] Atain-Kouadio JJ, Claudon L, Mazière P, et al. Méthode d'analyse de la charge physique de travail. Editions INRS ED; 2014. p. 6161.
[54] Sagot JC. Ergonomie et conception anthropocentrée. Document pour l'Habilitation à diriger des recherches. Nancy: Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL); 1999. p. 21.
[55] Thibault JF, Merlin X, Garrigou A. 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 2013, http://dx.doi.org/10.4000/pistes.3430 [15—2].
[56] Lux A, Mawo De Bikond J, Etienne A, et al. FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems. International journal of occupational safety and ergonomics 2016;22(4):557—64, http://dx.doi.org/10.1080/10803548.2016.1180856.
[57] Hoyos-Ruiz J, Martínez-Cadavid JF, Osorio-Gómez G, et al. Implementation of ergonomic aspects throughout the engineering design process: human-artefact-context analysis. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM) 2017;11(2):263—77, http://dx.doi.org/10.1007/s12008-015-0282-3.
[58] Dugué B, Petit J, Daniellou F. L'intervention ergonomique comme acte pédagogique. Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé 2010, http://dx.doi.org/10.4000/pistes.2767 [12—3].
[59] Martin C, Baradat D. Des pratiques en réflexion - Dix ans de débats sur l'intervention ergonomique. Toulouse: Éditions Octarès; 2003.

LA REVUE ACTIVITÉS PARIS
55éme CONGRÈS SELF
L'activité et ses frontières
Penser et agir sur les transformations de nos sociétés

EBSCOhost
The full text of SELF congresses proceedings in Ergonomics Abstracts is included in Academic Search Ultimate on EBSCOhost ™

www.ergonomie-self.org → Ergonomics abstract

Analyser les risques en maintenance aéronautique, un projet complexe de conception

Camille Murie[1-3], Flore Barcellini[1], Willy Buchmann[1], Lucie Cuvelier[2], Fabien Bernard [3], Raphaël Paquin[3]

[1] CRTD, CNAM Paris, 41 rue Gay Lussac, 75005, Paris

camille.murie@lecnam.net, willy.buchmann@lecnam.net, flore.barcellini@lecnam.net

[2] C3U-Paragraphe, Université Paris 8, 2 rue de la Liberté, 93526, Saint-Denis

lucie.cuvelier@univ-paris8.fr

[3] Airbus Helicopters, Aéroport International Marseille Provence, 13700, Marignane

fabien.bernard@airbus.com, raphael.paquin@airbus.com

Résumé. Afin de sécuriser la maintenance des hélicoptères, le Bureau d'Etude (BE) de maintenance d'Airbus Helicopters s'est engagé dans le développement d'une démarche d'identification et d'évaluation du risque d'erreurs en maintenance. Cette communication cherche à comprendre comment cette démarche a été conçue, comment elle évolue et quels en sont les usages au sein du BE Maintenance. Nous avons identifié que cette démarche est le fruit d'une conception distribuée d'un système d'artefacts parmi de nombreux concepteurs/usagers ne partageant pas tous les mêmes objectifs et appartenant à des mondes professionnels différents. Nous nous demanderons alors dans quelle dynamique collective s'inscrit construction de cette démarche.

Mots-clés : Conception, Sécurité, Ergonomie, FOH, Maintenance aéronautique.

Analysing risks in aeronautical maintenance, a complex design project

Abstract. In order to make helicopter maintenance safer, the Airbus Helicopters maintenance design office has undertaken to develop an approach to identify and assess the risk of maintenance errors. This communication seeks to understand how this approach is designed, how it is evolving and what are its uses within the Maintenance Engineering Department. We have identified that this approach is the result of a distributed design of a system of artefacts within many designers/users who do not all share the same objectives. We will investigate in what collective dynamic is the construction of this approach.

Keywords: Design, Safety, Ergonomics, HOF, Aeronautical Maintenance.

*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Paris, les 16, 17 et 18 septembre 2020. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante :

Murie, C., Barcellini, F., Buchmann, W., Cuvelier, L., Bernard, F., Paquin, R. (2020). Analyser les risques en maintenance aéronautique, un projet complexe de conception. Actes du 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. Paris, 16, 17 et 18 septembre 2020

Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page.

INTRODUCTION

Cette communication s'inscrit dans un travail de thèse en ergonomie qui vise à comprendre les modalités de conception et d'usages de dispositifs méthodologiques visant assurer la fiabilité des opérations de maintenance d'hélicoptères. Elle présente un travail de recherche mené au sein de l'équipe maintenabilité et du pôle facteur humain en maintenabilité d'Airbus Helicopters - constructeur d'hélicoptères civils, parapublics ou militaires.

Origine de la recherche

Selon Airbus Helicopters 6 à 10% des accidents et des incidents d'hélicoptères auraient une cause liée à une défaillance de maintenance. Dans la littérature aéronautique les défaillances de maintenance sont considérées comme étant la deuxième cause d'accident mortel derrière les erreurs de pilotage représentant entre 12% et 15% des accidents majeurs d'avions selon les auteurs (Tsagkas, Nathanael, & Marmaras, 2014; Shanmugam & Paul Robert, 2015). En avril 2016, un accident majeur impliquant une erreur de maintenance a initié une volonté d'amélioration de la conception de la maintenance par les constructeurs d'hélicoptères. Cette volonté s'est concrétisée par un appel à projet lancé par l'association de sûreté pour l'industrie du transport offshore par hélicoptères (Helioffshore). En 2017, le Bureau d'Etude (BE) Maintenance d'Airbus Helicopters a répondu à cet appel à projet en concevant sa propre méthode d'identification et d'évaluation du risque d'erreur, la démarche Human Hazard Analysis (HHA) (cf. infra). En 2018, cherchant à améliorer cette méthode, le service de maintenabilité contacte l'équipe d'ergonomie du Centre de Recherche sur le Travail et le Développement du Cnam et le laboratoire Paragraphe de l'Université Paris 8.

La démarche « HHA » d'identification et d'évaluation du risque d'erreurs

La démarche Human Hazard Analysis a été développée par le Bureau d'étude Maintenance qui participe avec d'autres bureaux d'étude à la conception de l'hélicoptère, d'outillages et de procédures de maintenance de celui-ci. En 2019, date de début de cette recherche il est composé notamment (Figure 1)[1] :

- D'un *pôle Facteur Humains*, deux ingénieurs Spécialistes Facteurs Humains (SFH) et de la première auteure de cette communication, doctorante ergonome ;
- D'une équipe *maintenabilité*, six System Design Responsible (SDR), ingénieurs en maintenabilité ;
- D'un team facilitateur, expert en maintenabilité, dont la mission est d'être un support pour les SDR et les SFH ;
- D'un expert en maintenance ayant une fonction de référent dans son domaine auprès de plusieurs équipes du BE Maintenance ;
- De quatre architectes de maintenance qui assurent la cohérence et de la fiabilité de la maintenance de façon transverse à toutes les équipes du bureau d'étude de maintenance ;
- De deux managers chargés de la gestion des équipes.

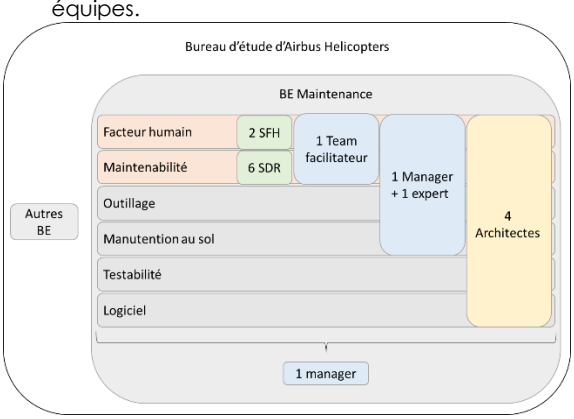


Figure 1 : Les acteurs du BE Maintenance ayant contribué à la conception de HHA

Ces acteurs ont contribué à la conception de la démarche Human Hazard Analysis qui est constituée de 4 étapes :

1) Le choix des tâches dites sensibles (les tâches pour lesquelles une « défaillance » entrainerait un accident ou un incident en vol) par des ingénieurs d'un autre bureau d'étude.
2) L'enquête client : Un groupe de travail composé du team facilitateur, de l'expert en maintenance et de mécaniciens clients (membres de l'association Helioffshore) et d'Airbus évalue le risque « d'erreur humaine » pour chaque tâche identifiée à l'étape 1. Ils attribuent un score de 1 (pas de risque) à 5 (risque élevé) à différents critères : la fréquence de la tâche, l'accessibilité, les ressources de temps et de main d'œuvre, la documentation (carte de travail) et l'utilisation d'outils spéciaux.
3) **L'analyse Facteurs Humains :** Les Spécialistes Facteurs Humains procèdent à une analyse des tâches considérées comme les plus sensibles par l'enquête client de l'étape 2. Cette analyse s'appuie sur des simulations réalisées avec des mécaniciens d'Airbus, selon différentes modalités (selon le niveau de complexité des tâches et les ressources disponibles) :

- Une lecture commentée des procédures prescrites (appelées dans ce cas « cartes de travail »), en salle ou devant hélicoptère
- La réalisation de la tache en réalité virtuelle ou sur hélicoptère

Les SFH rédigent ensuite un rapport d'analyse qui s'appuie sur l'outil interne HEMEA, Human Error Mode and Effect Analysis. Ce rapport recense, pour chaque tâche analysée : le détail de l'erreur possible, un score de sensibilité aux facteurs humains, les

[1] D'autres personnes font partie d'autres équipes au sein du BE Maintenance mais nous ne présenterons ici que les acteurs nécessaires à la compréhension de cette communication [1]

recommendations des SFH faisant office de barrières aux risques et le score potentiel de sensibilité aux facteurs humains si ces barrières étaient mises en place. Le « score de sensibilité aux facteurs humains », est le produit de la probabilité d'occurrence de l'erreur et des conséquences de l'erreur et qui donne un score de 1 à 5.

4) La relecture collective des rapports FH : Les rapports FH sont ensuite relus en interne du BE de maintenance par un manager et un architecte pour d'éventuelles corrections ou modifications avant validation et communication aux acteurs de la conception concernés.

Parmi les objectifs de cette recherche-action, il s'agit de proposer des modifications de la démarche HHA, c'est-à-dire de contribuer à sa conception. Ceci implique dans un premier temps de mieux comprendre comment cette démarche a été conçue, comment elle évolue et quels en sont les usages au sein du BE Maintenance. Pour cela, nous nous appuyons sur l'approche instrumentale et les travaux en ergonomie de la conception.

CADRE THEORIQUE

Le dispositif HHA vu comme un système d'artefacts ?

Ici l'objet de conception du service de maintenabilité est une méthode d'analyse des risques en maintenance que ces concepteurs considèrent comme un outil, et que nous proposons de voir au travers de l'approche instrumentale. Dans cette approche, on considère que les artefacts sont les médiateurs de l'action et de l'activité finalisée des opérateurs, ici les membres du bureau d'étude maintenance (Rabardel, 1995). Pour comprendre comment opère cette médiation il faut distinguer l'instrument de l'artefact. En effet, l'instrument est composé de l'artefact, objet technique, matériel ou symbolique et de schèmes d'utilisation associés, construits par le sujet ou de schèmes sociaux d'utilisation que le sujet s'approprie (Folcher & Rabardel, 2004). Une des composantes de cette genèse instrumentale est l'instrumentalisation. L'instrumentalisation est caractérisée par « *l'émergence et l'évolution des fonctions de l'artefacts* » (Bourmaud, 2013). Cependant, un instrument/artefact n'est jamais isolé et les opérateurs mobilisent le plus souvent un ensemble d'instruments/artefacts liés et organisés entre eux ce qui définit un système d'instrument/artefacts. Nous considérerons donc ici la démarche HHA comme un système d'instruments/artefacts.

Le dispositif HHA vu comme le résultat d'un processus de conception distribuée ?

Les travaux en sciences de la conception mettent en avant le caractère distribué de la conception (p.ex. Darses et Falzon, 1996) : dans le temps, dans l'espace ou dans diverses organisations, et parmi divers protagonistes porteurs de buts et de perspectives qui leurs sont propres. Ces perspectives se traduisent dans une dimension modulaire de la conception liée aux divers artefacts ou systèmes d'artefact conçus, chaque artefact pouvant être pris en charge par un protagoniste différent de la conception. De ce fait, les processus de conception revêtent souvent un caractère « conflictuel ». Concevoir nécessite alors négociations et arbitrages entre ces différentes perspectives et buts. Les artefacts conçus sont ainsi le résultat de ces différents arbitrages en lien avec l'intention de conception initiale (Bucciarelli, 1988). Ce processus de conception se poursuit dans l'usage de l'artefact par les usagers qui peuvent développer de nouveaux usages qui peuvent eux-mêmes être repris par les concepteurs (Bourmaud & Rétaux, 2002). Comprendre un processus de conception nécessite donc : de caractériser les perspectives et les buts des différents protagonistes ; leurs rôles par rapport à cet artefact et d'identifier les points de conflits potentiels ; de caractériser l'intention de conception initiale et les évolutions de l'artefact conçu, en lien notamment avec l'évolution de ses fonctions liées à l'usage.

Au vu de ces éléments de la littérature et des enjeux de la demande qui nous est formulée, nous proposons de nous intéresser aux deux questions suivantes : Quelles sont les caractéristiques du processus de conception de la démarche HHA et ses fonctions ? Quelles sont les évolutions de ses fonctions et de ses usages ?

METHODOLOGIE

Comprendre l'intention initiale et les évolutions de la démarche et identifier les concepteurs

Nous avons mené deux entretiens semi directifs : un entretien collectif avec deux des trois concepteurs initiaux de la démarche et un entretien avec un spécialiste facteur humain, utilisateur de cette démarche. Les évolutions des formes de rapport ont été utilisées comme support de discussion. Le but de ces entretiens était de saisir les intentions des interviewés au lancement de la démarche et d'identifier les évolutions éventuelles de cette démarche au fil des années. Ces entretiens ont été retranscrits puis codés pour caractériser le processus d'instrumentalisation par l'identification des fonctions associés à la méthode HHA et leurs évolutions.

Par ailleurs, nous nous sommes particulièrement intéressés à l'étape 3 de la démarche, portée par les SFH. Nous avons réalisé des observations ouvertes non participatives de l'activité des SFH du service liée à l'utilisation de la démarche HHA (réunion de préparation, simulation, rédaction des rapports, réunion de suivi des analyses). L'objectif de cette première phase exploratoire était de comprendre l'activité des SFH en lien avec la démarche, ce qui nous a permis de comprendre l'artefact « démarche HHA », d'identifier les acteurs impliqués dans la création et dans quelle vision de la sécurité la démarche HHA se situait.

Comprendre l'usage de la démarche HHA

Une technique inspirée des protocoles verbaux concomitante à la tâche (Ericsson & Simon, 1998) a été utilisée à 4 reprises :

- Avec une SFH sous-traitante au cours de la rédaction d'un rapport dans sa version 2019 (1h30 d'observation).
- Avec un SHF (docteur ingénieur ergonome) au cours de la rédaction d'un rapport dans sa version 2020 (1h46 d'observation).
- Avec le responsable d'équipe maintenabilité, au cours de la relecture d'un rapport (1h d'observation).
- Avec un architecte en maintenance, au cours d'une relecture de rapport (1h d'observation)

L'objectif était d'avoir accès aux buts des SFH durant l'écriture du rapport et observer l'usage de l'artefact « rapport ». La consigne donnée était la suivante : « *Lors de la rédaction de ce rapport dites-moi tout ce qui vous vient à l'esprit* ». Ces verbalisations ont été enregistrées puis retranscrites. Les retranscriptions des verbalisations ont été codées afin d'identifier les buts et les fonctions associés au rapport.

RESULTATS

Une conception distribuée d'un système d'artefact

Une première analyse nous permet de préciser les différentes fonctions des protagonistes dans la conception de la démarche HHA. La conception et l'usage de ce système d'artefact a été distribuée dans plusieurs groupes. La conception de la démarche HHA a été initiée par le team facilitateur et l'expert. Ils ont adapté une méthode d'identification et d'évaluation du risque d'erreur, Human Hazard Analysis (HHA) originellement développée pour Airbus avion (Lawrence & Gill, 2007). Ils ont pris comme donnée d'entrée les tâches de maintenance dites sensibles commandées à d'autres BE pour concevoir et réaliser eux même l'enquête client. Cette enquête client fournit au SFH la liste des tâches de maintenance à simuler, les SFH sont donc des usagers de l'artefacts enquête client. Les SFH ont ensuite construit l'artefact « simulation des tâches » et conduisent eux-mêmes ces simulations. La conception du premier rapport d'analyse a impliqué le team facilitateur, les SFH, les architectes et les managers. Ces concepteurs utilisent le rapport pour communiquer avec les acteurs de la conception de l'hélicoptère concerné. Le tableau ci-dessous (tableau 1) synthétise le rôle de chacun des acteurs dans la conception et l'usage du système d'artefact avec C = Concepteurs et U = Usagers. Les acteurs de la démarche peuvent être concepteur et/ou usagers des artefacts en fonction du contexte.

Tableau 1: Rôle des différents acteurs dans la conception et l'usage du système d'artefacts

	Choix des tâches sensibles	Artefact Enquête client	Artefact Simulation	Artefact Rapport
SDR autres BE	C			
Expert	U	C+U		
Team Facilitateur	U	C+U		C+U
SFH		U	C+U	C+U
Architectes				C+U
Managers				C+U
SDR maintenabilité + Acteurs de la conception concernés				U

Des attributions de fonctions multiples et évolutives du système d'artefact

Ici nous cherchons à mettre en évidence les fonctions qu'attribuent les concepteurs et les usagers de la démarche aux différents artefacts et leurs évolutions sur les années 2018, 2019 et 2020. S'il y a un ajout ou une suppression de fonction attribuée aux artefacts après 2018 nous l'indiquerons par les symboles – (suppression) et + (ajout). S'il n'y a pas d'indication, les fonctions de 2018 sont considérées comme toujours opératives pour 2019 et 2020.

Tableau 2 : Attributions et évolution des fonctions de l'artefact enquête client

Expert+ Team Facilitateur (C+U)	**Fonctions 2018** : Identifier les tâches sensibles au Facteur Humain Prioriser des tâches pour la simulation Recueillir le feedback client Être visible auprès des clients **Fonctions 2019** : + Favoriser l'apprentissage mutuel SDR/mécaniciens + Analyser qualitativement des tâches les plus sensibles
SFHs (U)	**Fonction 2018** : Fournir les données d'entrée pour la simulation **Fonction 2019-2020** : + Supporter l'analyse des risques

Tableau 3 : Attributions et évolution des fonctions de l'artefact simulation

SFH (C+U)	**Fonctions 2018** Identifier les risques d'erreur Identifier les risques pour l'OP Identifier les variabilités interindividuelles **Fonctions 2019-2020** - Identifier les variabilités interindividuelles

Tableau 4 : Attributions et évolution des fonctions de l'artefact rapport

Team Facilitateur + Managers (C+U)	**Fonctions 2018-2020 :** Suivre les indicateurs de performance Communiquer auprès d'Airbus et de ses clients Prescrire aux acteurs de la conception
SFH (C+U)	**Fonctions 2018** : Communiquer sur la démarche Être un support d'analyse des risques Mettre en avant l'activité des OP Être un support de débat pour trouver les solutions **Fonctions 2019** : - Communiquer sur la démarche **Fonctions 2020** : - Mettre en avant l'activité des OP
Architectes (C+U)	**Fonctions 2019-2020** Être source de prescription des risques à prendre en compte Être un support pour argumenter auprès des acteurs de la conception
SDR maintenabilité + acteurs de la conception (U)	**Fonctions 2018-2020** Être un support de débat pour trouver ou rejeter les solutions Être un support de prescription

La conception de la démarche HHA débutée en 2017 continue d'évoluer jusqu'en 2020 avec l'arrivée progressive des SFH, des managers et des architectes.

Les concepteurs de l'artefact enquête client ont donné à l'artefact des fonctions d'usage à destination des SHF qu'ils pensaient être les fonctions « prioriser les tâches » et « recueil de feedback » (voir tableau 2). Cependant les SFH ont fait usage de la fonction « Identifier les tâches sensibles au Facteur Humain » et non « prioriser les tâches » car elle n'était pas opérationnelle au vu des contraintes de leur activité. Les SFH n'ont également pas utilisé le feedback client en 2018 qu'ils jugeaient trop pauvre. Les concepteurs de l'artefact enquête client ont alors étendu les fonctions de l'artefact pour eux même et pour les SFH. Ils ont ajouté une fonction d'analyse qualitative des tâches jugées comme les plus sensibles pour fournir plus de données qualitatives aux SFH. Les SFH ont pu les utiliser au travers des commentaires clients recueillis.

Pour les artefacts simulation et rapport nous observons une réduction des fonctions données par les SFH entre 2018 et 2020. L'année 2018 a été considérée par les concepteurs et utilisateurs de la démarche comme une année d'expérimentation car dans un contexte de réalisation d'une thèse par le SFH. Par exemple, en 2018 les SFH associaient à l'artefact simulation la fonction « identification des variabilités interindividuelles » en comparant des simulations de mêmes tâches réalisées par différents opérateurs (voir tableau 3). En 2019 et 2020 les managers ont dû intégrer à la démarche des contraintes budgétaires et temporelles. Les SFH n'ont alors observé qu'un opérateur par tâche et ont dû supprimer la fonction « identification des variabilités interindividuelles » de l'artefact simulation. L'artefact rapport avait en 2018 pour les SFH une fonction de mise en avant de l'activité des opérateurs pour réaliser la tâche en sécurité et non exclusivement l'identification des erreurs potentielles. Ils utilisaient la case « détail de l'erreur » comme un espace pour indiquer les « bonnes pratiques » observées lors des simulations. L'entrée d'autres acteurs dans la conception du rapport en 2019 (cf. infra) apportant de nouvelles contraintes et de nouveaux objectifs a amené la suppression de cette fonction.

Divergence d'objectifs dans la conception

Dans cette partie nous présenterons les divergences d'objectifs des différents concepteurs et usagers du système d'artefact expliquant les évolutions des fonctions attribuées au système d'artefact.

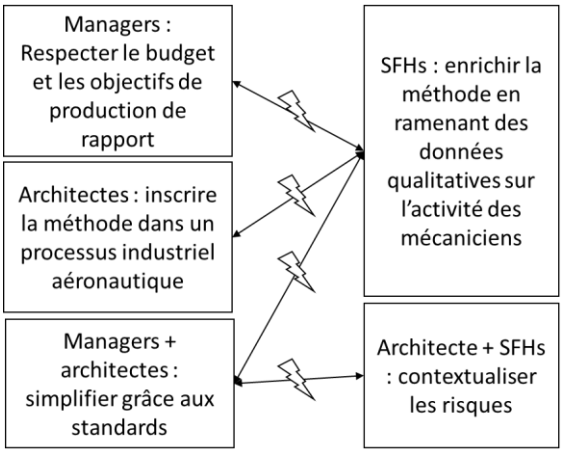


Figure 2 : Divergences d'objectifs des protagonistes

A partir de 2019, les managers de maintenabilité ont ajouté l'objectif « *d'industrialiser la méthode* » à la démarche. Le temps d'analyse par les SFH des tâches a alors été réduit par rapport à 2018. Les architectes ont souhaité inscrire la démarche dans le processus plus général de conception de l'entreprise. Pour les rapports de 2020 les architectes ont demandé que l'identification des risques se base sur une liste de risques standards avec des solutions et des scores automatiquement associés. Leur objectif était ici de rendre « *plus lisible l'analyse* » des rapports pour leurs destinataires et d'aider les SFH à identifier et rédiger plus rapidement les risques d'erreurs et atteindre les objectifs de rendu des rapports. Les SFH doivent donc en 2020 choisir dans une liste de risques tous ceux qui correspondent au mieux à la situation. Ceci est en contradiction avec l'objectif des SFH de mettre en avant l'impact qu'a le contexte et l'activité du mécanicien sur les risques. Paradoxalement le manque de contexte donné aux différents risques standards est regretté par un des architectes. De plus selon lui, ce n'est pas l'exhaustivité des risques et leur standardisation qui doit primer mais la possibilité effective de changement dans la conception des procédures de maintenance et de l'hélicoptère des risques avec un score élevé.

DISCUSSION

Deux approches de la fiabilité par deux mondes professionnels différents

A ce niveau de résultat nous pouvons distinguer un but commun à tous les protagonistes qui est

d'améliorer la fiabilité de la maintenance d'hélicoptère. Cependant les objectifs intermédiaires de certains groupes et les fonctions qu'ils donnent à la méthode HHA nous montre à voir deux mondes professionnels différents, le monde des SFH et le monde des architectes. Nous empruntons ce concept de monde à Béguin (2007) qu'il définit comme « *un ensemble d'arrière-plans conceptuels, axiologiques et praxiques qui forment système avec les objets de l'action* ». Le monde des SHF est tourné vers l'identification et la compréhension des risques d'erreur. Ils cherchent une certaine exhaustivité dans l'identification des risques en étudiant l'activité de l'opérateur, opérateur qui fait des erreurs mais peut aussi être une source de sécurité. Le monde des architectes est tourné vers le degré d'urgence à éliminer et réduire ces risques et aux coûts que cela impliquerait pour l'entreprise. Ils sont eux-mêmes engagés dans la conception plus large de l'hélicoptère et veulent donc inscrire la démarche HHA dans les processus de management de la sécurité existant dans l'entreprise afin de la rendre plus opérationnelle dans leur activité propre.

Articulation des divergences d'objectif

Selon Béguin (2007) le travail de conception implique un travail d'articulation des mondes professionnels différents pour créer un monde commun qui situe les positions relatives de chacun sans qu'un monde s'impose sur l'autre. Nous pouvons nous demander ici si la divergence des objectifs de chacun a été le socle de la construction de la démarche ou au contraire si certains objectifs se sont imposés sur les autres. En effet les objectifs des architectes et des SFH ne sont pas contradictoires en soit. L'intégration de la démarche HHA au processus global de la conception dans l'entreprise peut s'articuler avec une étude fine des risques d'erreurs dans leur contexte. A l'instrumentalisation du système d'artefact développé par les SFH en 2018 viendrait s'ajouter celle des architectes en 2019 et 2020. L'évolution de la forme des rapports semble privilégier aujourd'hui le processus d'instrumentalisation des architectes mettant en avant l'insertion dans le processus global de conception de l'entreprise. On pourrait alors considérer que les SFH ont alors accommodé leurs schèmes d'utilisation du système d'artefacts qu'ils avaient développé en 2018.

CONCLUSION

La démarche HHA a impliqué une conception distribuée d'un système d'artefacts par de nombreux concepteurs/usagers ne partageant pas tous les mêmes objectifs intermédiaires mais visant un but commun, fiabiliser la maintenance. Par cette première étude nous avons pu identifier une partie des positions relatives de deux mondes professionnels participant à la conception et aux usages de la démarche HHA, celui des SFH et celui des architectes. D'autres acteurs et d'autres mondes professionnels sont impliqués dans cette que nous n'avons pas encore caractérisés. C'est le cas des managers en maintenabilité mais aussi des utilisateurs finaux du rapport, les SDR en maintenabilité et les autres acteurs de la conception. De plus la méthodologie employée ne visait pas l'accès des lieux de négociation et ni d'approfondir le processus de conception de la démarche HHA en lui-même. La suite de la recherche de thèse s'intéressera donc à approfondir les résultats présentés et à les élargir pour faire face aux limites identifiées. Notre ambition est de nous inscrire ainsi dans une recherche-intervention qui contribuerai à la conception de la démarche HHA vue comme un système d'artefacts soutenant le développement d'un monde commun visant la fiabilité de la maintenance.

BIBLIOGRAPHIE

Barcellini, F. (2015). Développer des interventions capacitantes en conduite du changement. Comprendre le travail collectif de conception, agir sur la conception collective du travail (Doctoral dissertation).

Béguin, P. (2007). Innovation et cadre sociocognitif des interactions concepteurs-opérateurs: une approche développementale. *Le travail humain*, *70*(4), 369-390.

Bourmaud, G. (2013). De l'analyse des usages à la conception des artefacts : Le développement des instruments. *Ergonomie constructive*, 161-173.

Bourmaud, G., & Rétaux, X. (2002, November). Rapports entre conception institutionnelle et conception dans l'usage. In *Proceedings of the 14th Conference on l'Interaction Homme-Machine* (pp. 137-144).

Bucciarelli, L. L. (1988). An ethnographic perspective on engineering design. *Design studies*, *9*(3), 159-168.

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1998). How to study thinking in everyday life: Contrasting think-aloud protocols with descriptions and explanations of thinking. *Mind, Culture, and Activity*, *5*(3), 178-186.

Falzon, F., & Darses, F. (1996). La conception collective : une approche de l'ergonomie cognitive. *Coopération et conception*, 123-135.

Folcher, V., & Rabardel, P. (2004). Hommes, artefacts, activités: perspective instrumentale. *Ergonomie*, 251-268.

Lawrence, P., & Gill, S. (2007). Human hazard analysis: A prototype method for human hazard analysis developed for the large commercial aircraft industry. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, *16*(5), 718-739.

Shanmugam, A., & Paul Robert, T. (2015). Ranking of aircraft maintenance organization based on human factor performance. *Computers & Industrial Engineering*, *88*, 410-416.

Tsagkas, V., Nathanael, D., & Marmaras, N. (2014). A pragmatic mapping of factors behind deviating acts in aircraft maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *130*, 106-114.

Rabardel, P. (1995). *Les hommes et les technologies; approche cognitive des instruments contemporains*.

Received: 26 April 2021 | Revised: 25 August 2021 | Accepted: 11 September 2021

DOI: 10.1002/cae.22461

RESEARCH ARTICLE

WILEY

Digital simulation tools in aviation maintainability training

Fabien Bernard[1,2] | **Xavier Bonnardel**[1] | **Raphael Paquin**[1,2] | **Martial Petit**[1,2] | **Killian Marandel**[1] | **Nicolas Bordin**[1] | **Françoise Bonnardel**[1]

[1]POLYAERO, Tallard, France

[2]Airbus Helicopters, Marignane, France

Correspondence
Fabien Bernard, POLYAERO, Zone Aérocamp, Aérodrome de Gap-Tallard, Tallard 05130, France.
Email: fabien.bernard@airbus.com

Abstract

Aviation maintenance needs to be continuously improved for many reasons: flight safety, the health of maintenance operators, and saving time and costs among other reasons. To preventively improve the working conditions, the Maintainability Department—the department designing the maintenance activity in the Technical Design Office—develops and uses simulation tools such as Virtual-Reality (VR). To improve maintenance, maintainability stakeholders must perform Human Factors analysis through simulation tools. However, the use of VR requires specific knowledge and skills that should be learned by students in the university. The aim of this paper is to study the use of VR as a Teaching & Training tool as well as an Industrial tool in real on-the-job cases. Over 2 years (between 2018 and 2020), we have trained and observed 112 students. Two main surveys have been used, the first one at the beginning of the academic year (to better know students' previous experience in VR) and the second survey at the end of the year (to get students' feedback regarding their training year with VR). We have formulated and presented recommendations to apply better inductive-deductive teaching approaches offering more cases studies and a better understanding of aviation maintenance by students. We have also made recommendations to improve the use of VR, for example, to reduce the discrepancies and inaccuracies between the virtual and real worlds.

KEYWORDS

aviation, education, maintainability, simulation, Virtual-Reality

1 | INTRODUCTION

Maintenance has become a strategic sector and a key activity in aviation. Indeed, the aviation industry has made a critical observation about maintenance being a causal factor in 14%–21% of helicopter accidents (for US civil fleet) [1] and 12% of plane accidents [18]. Indeed, it is now clearly established that the area of industrial maintenance represents the second highest cause of aviation accidents [29], as well as being the main industrial activity where work accidents occur (European Agency for Safety and Health at Work). Additionally, the maintenance activity of aircrafts is very expensive, representing a quarter of total airline costs spending per year [42]. Thus, the aviation industry continuously strives to improve the reliability of maintenance to ensure flight safety, to avoid human errors as well as ensuring the health and safety of maintenance operators.

 © 2021 Wiley Periodicals LLC

Indeed, to reduce the time for completing the maintenance task and to improve safety, a dedicated department exists in the Technical Design Office, named Maintainability. The goal of all maintainability stakeholders is to improve aircraft design, maintenance tools design, and maintenance procedures [1,9]. To be operational, all maintenance stakeholders need to know the exact maintenance activities performed by operators. In the aviation industry, to anticipate future maintenance activity, digital tools such as Virtual-Reality (VR) are used more and more often. This new technology has been an integral part of the aviation industry for many decades. VR was first introduced and used to simulate flight sequences in static or dynamic simulators at the end of World War II [33]. Thus, simulators emerged to teach and train pilots in onboard instruments and their impact on the behavior of the aircraft [19]. More recently, the use of VR has been also applied to the design stages. The interaction it provides between the user and the immersive environment makes it possible to simulate tasks such as maintenance in the aeronautical sector [16,31]. Industrialists focused more specifically on critical areas that require regular intervention such as engines. As accessibility is often not very easy, VR platforms have made it possible to determine maintenance tasks, as well as the future constraints for a maintenance operator [4]. The study by Amundarain et al., for example, shows the importance of the study and analysis of the visual field for handling parts in a complex environment, again very specific to engine maintenance. This problem of engine maintenance has also been the subject of studies based on physical-sensory feedback. The studied haptic system has shown its efficiency to perform the analysis of maintenance tasks all around the entire engine-wide workstation. In fact, this system followed the operator in their movements and made it possible to diagnose different working positions. This system, dedicated to a specific engine, made it possible to study the human factors criteria of the simulated tasks. Haptic systems are a real and important element of development, leading to an optimal evaluation since they go beyond visual and sound immersion [30]. However, in maintainability, some studies have shown that VR technology is not used efficiently to perform design and human factors analyses. Broberg [11], Bernard et al. [8] explain this phenomenon as the skills and knowledge of the users, here called maintainability stakeholders, mainly dedicated to design and mechanics. Therefore, the studies explain that VR technology is often used more by intuition rather than by expertise, without capitalizing on the full potential of this technology. We can make a hypothesis by analyzing the last generation of students who have not received any lectures about the use and the performance of digital tools in an industrial context. However, since the 1990s, and the first appearance of modern VR technology by *Jason Lanier*, lots of studies have been conducted regarding the use of VR in the classroom [27]. Indeed, VR has been extensively studied in a research context as a potential future tool enabling students to learn and memorize information more efficiently. VR, by definition, is highly interactive in a fully immersive environment [20]. This interaction and immersion were considered as the key to improving teaching and training methods. Today, many schools and universities use such immersive technology as teaching and training tools. However, only a few training centers use VR to train students as future users of this technology, with real-life industrial cases studies.

Thus, the main research questions and objectives of this paper are to determine if the VR could be efficient in the aviation maintenance context as a Teaching & Training tool but also as an Industrial tool in real on-the-job cases. So, our paper aims to observe the use of VR through industrial case studies in a university context. First, we will detail the university context and the advantages of using VR. In addition, we will examine the aspect of student learning while using VR in real-life industrial aviation maintenance case studies. We have observed 112 students over 2 years to get their feedback and follow their learning progression between the beginning and the end of their training year. Finally, we will discuss our results and we will make recommendations regarding improved VR methodologies for students benefiting from using industrial contexts.

2 | CONTEXT

2.1 | General context in maintainability training

The observational trial has been lead by and has taken place in a leading French Aviation Institute, *Polyaero* (Aix-Marseille University). The particularity of this Institute is the teaching and training methods used, based on inductive and deductive approaches. First, we need to agree on the definition of inductive and deductive. Generally speaking, the term “deductive” refers to the teaching approach of starting from the general concept and subsequently working toward the specifics of the concept (i.e., from “general rules” to “specific examples"), while the term “inductive” refers to the teaching approach of starting from the specifics of a concept and subsequently working toward the general (i.e., from “specific examples” to “general rules") [13]. Lots of

research explores the comparison between both inductive and deductive approaches [34,36,37]. In aviation, and more specifically in training maintainability and maintenance, tasks are very numerous and very varied. To learn efficiently and effectively, as well as ensuring a high level of safety and quality, *Polyaero* offers all their students, in all of their training courses, an inductive approach at first followed by a deductive approach, to consolidate the students' understanding of the maintenance activities.

2.2 | Benefits of simulation tools in education

For the last three decades, aviation industries have integrated simulation tools to improve the design and anticipate human intervention. The concept of simulation in Human Factors has been addressed and documented many times, often following specific needs arising from real-life cases in the aeronautical [22] or nuclear industries [39]. Simulation in ergonomics has two key goals: anticipating future maintenance activity in the design steps as well as educating and training the operator in a new workstation. In both cases, "simulation is basically the attempt to reverse or invert the course of time to alleviate its main effects and attempt to master it" [14]. In other words, the simulation must provide sufficient information to the designer and/or the operator for them to appropriate the future environment to discern all the subtleties of the potential interaction between humans, the system, the workstation, the tool and the environment. The designer can then effectively do their role, to modify their technical specifications to adapt it to the characteristics and expectations of the operator. Also, the operator will be able to know the strategies to adopt, the essential information to memorize and train their specific movements to carry out their activity as efficiently as possible, by respecting all health and safety regulations. Beyond training, simulation also makes it possible to anticipate "human errors," particularly in the nuclear sector [41] or even in aeronautics [35]. Indeed, these authors propose to use digital simulation tools such as VR to study, understand, and anticipate operator behavior. By implementing numerous simulations that put operators to the test under different conditions, it becomes possible to observe recurring errors, which can be corrected by improving the systems, the physical environment, or the operator training.

This industrial integration of digital simulation tools with maintenance and maintainability influences some universities to recruit new lecturers to train students in the use of VR. Thus, there are now two mains uses of VR in a university context: application with real-life industrial maintenance case studies (an inductive approach) as well as a teaching and training tool (deductive approach) [26,37]. To assess the potential of VR in an aviation maintenance institute, our observations are detailed in the following section.

3 | OBSERVATION

3.1 | Method

Based on the previous state of the art, we can formulate the following hypothesis: VR is an efficient tool to train students in aviation maintainability. To study this hypothesis, we propose to perform an observation in a leading French Aviation Institute based on students' training regarding the use of VR, specifically on the students in the maintenance and maintainability training program. This training is dedicated to students in the third and final year of their French Higher National Diploma in Aeronautic Maintenance with *Part66 Certification* (theoretical rating, European Aviation Safety Agency). The students are already working in an aviation company as they have all signed an Apprenticeship contract within aeronautic companies throughout France. Over a period of 2 years (2018–2020), a total of 112 students have participated in the observational survey in the Aviation Institute *Polyaero* (Aix-Marseille University).

3.2 | Description of the courses

The content of this training is organized around digital mock-ups and their use to improve helicopter maintenance through design, which is known as a human-centric design [28]. A French helicopter manufacturer has provided the complete Digital Mock-Up of a helicopter, which is accessible and at the disposal of the students in a *CAVE* (*Cave Automatic Virtual Environment*) using VR with special VR goggles or otherwise called, an immersive VR headset.

A VR software is used to display in real-life scale (scale 1:1) and interact with the Digital Mock-Up (Figure 1). Before using the immersive experience, it is necessary to convert Digital Mock-Up *CAD* (*Computer-Aided Design*) files into optimized VR maps. The software solution used, *SkyReal*, offers a dedicated module for this model conversion. Once converted, the map is loaded with 3D *Unreal Engine* from *Epic Games*. This video game component provides the latest cutting-edge technology for 3D display and VR rendering with generic access to standard VR ecosystem components,

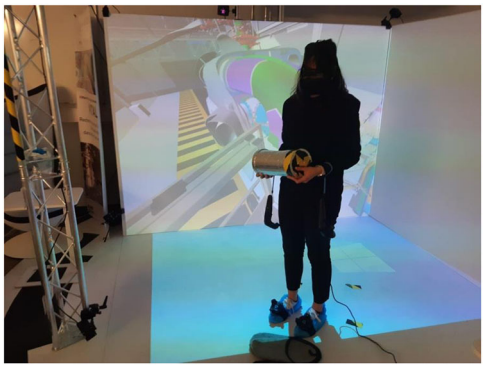


FIGURE 1 Virtual-Reality platform with a student simulating a maintenance task



FIGURE 2 Students working on Computer-Aided Design software for preparing Human Factors analysis on a virtual platform

such as *OpenXR*, *Steam*, *Oculus*, *Windows Mixed Reality*, and *CAVE*. *SkyReal* offers a standard way to use VR with a dedicated toolset for engineering, whatever the immersive equipment. These functional features are split into various parameters with options: Appearances, Grab, Navigation, Selection, Virtual-Manikin, Design in VR, Physical Collision. *SkyReal* offers multiusers VR sessions with online users as it uses *Unreal Engine* replication system, which is also used for video games such as *Fortnite*. It manages the live synchronization of hundreds of thousands of data and enables the creation and designing of review meetings between users.

Students have access to this Digital Mock-Up (DMU), thanks to the CAD system (Figure 2). This first approach allows anticipating the main interactions between the operator and their environment, as well as anticipating posture, force, and the main ergonomic constraints [4,5,17] to better prepare the VR simulation. To help students understand helicopter technology, *Polyaero* Institute also offers students access to onsite physical aircrafts so that students can compare both "the digital world and the real world" to better understand the benefit of digital tools and perspectives in the design process. Additional 4.0 technologies are accessible to students, such as 3D printing and scanning, which enable improving VR realism and representativeness.

VR sessions are organized with groups of eight students who have analyzed various case studies based on real helicopter maintenance procedures and their Digital Mock-Ups. Each student takes a different role and responsibility (designer, maintenance documentation authoring, mechanics, ergonomics, 3D printing, VR) and must collaborate together in a professional context as if in a real professional situation. All sessions allow students to analyze several case studies for which specific issues were created for training purposes. The VR training course takes place over six full nonconsecutive days throughout the training year, followed by additional sessions dedicated to supporting the students in applying their new VR skills. They had to perform an ergonomic analysis of each case study and each solution to ensure the Health & Safety of maintenance operators as well as increasing the efficiency and productivity of the activity and task. Such improvements can be a maintenance procedure improvement, a helicopter or tooling design change, or maintenance organization optimization [1].

Figure 3 shows VR Training Curriculum Timeframe throughout the Academic Year, divided into three stages. Between the beginning of the training year (September and November), lectures are dedicated to theoretical elements and aspects of the VR-used definition and technical criteria. Students also learn some applications of VR, whatever the industrial sector (automotive, train, computers...) with a focus on the maintenance activity to prepare the next steps. The second stage, between November and March, enables students to get hands-on and practical experience through various industrial case studies. Students discover the use of VR to lead maintainability and human factors study to propose a viable solution. The final stage, until July, is the logical continuity of the learning process; students continue with more autonomy to develop and implement the solution defined in Stage 2.

3.3 | Materials

To assess the benefits of VR in *Polyaero* and more specifically in the maintenance training courses, two surveys have been designed according to specific research literature [10]. The first survey was conducted at the beginning of the academic year. It focuses on basic information about each student as detailed in Table 1.

The second survey was conducted at the end of the training year, having studied and learned new skills and

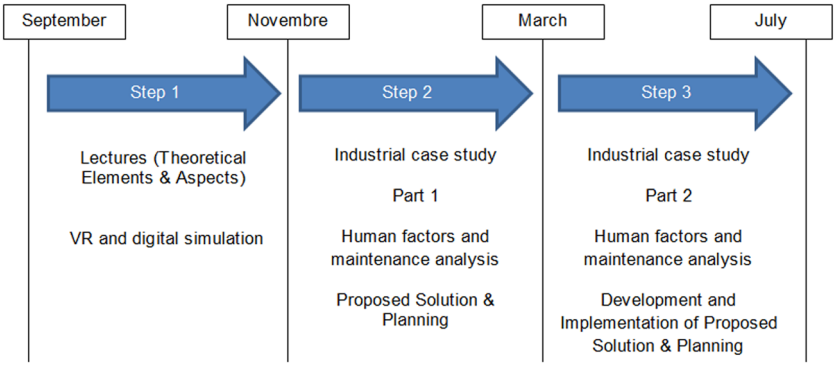


FIGURE 3 Virtual reality training curriculum timeframe (theoretical and practical) throughout the academic year

TABLE 1 Questions for Survey 1

Reference	Question
Q1	In what year were you born?
Q2	Male/female?
Q3	What are your previous studies and professional background?
Q4	What are your previous experiences and skills in VR?

Note: Students were asked for their individual feedback and opinions for the following questions.

knowledge in VR dedicated to aviation maintenance. It focused on students' feedback after a year of training and was composed of six questions summarized in Table 2. To avoid any influence, the student is allowed to answer freely all questions without a list of possible, suggested answers.

3.4 | Procedure

On Survey 2, we used the verbatim [32] methodology to extract criteria corresponding to the main category of response. We used the analysis of variance (*ANOVA*) test to compare, for each question/response of Survey 2, the percentage of the apparition of the criteria. *Fisher*'s exact test was used to test the two relationships between the questions/responses of Survey 1 (at the beginning of the training year) and the questions/responses of Survey 2 (at the end of the training year):

- the relationship between the student with previous VR experience and their judgment on whether their previous VR experience is sufficient to pass the full training year;
- the relationship between the student with previous VR experience and if the VR training sessions during the training year have enabled them to improve their skills in maintenance and maintainability.

We have repeated the test with students without previous VR experience.

To explore the influence of the students already having previous experience in VR before starting the training year and students without previous VR experience, we compared using repeat-observations, thanks to the Student t test, the average percentage of the main criteria defined in the verbatim study of Survey 2.

To go further, we looked to identify the consideration of each criterion, whatever the question, for students with and without previous experience in VR.

Our results are considered to be statistically significant if the "p-value" is strictly less than 5% ($p < .05$).

4 | RESULTS

The first survey determines the demographic information of the population studied, both the students with and without previous experience in VR. A total of 112 students, 11 females and 101 males, aged 19–43 (mean: 21.21, SD: 2.98) have participated over 2 years (2018–2020). Forty-one students (46%) had already used VR, among them 38 (34%) only through video games or demonstration and 3 (2.5%) students during a work context to participate with the codesign review in a Technical Design Office during the apprenticeship training period. We can also note that age or gender does not influence the results.

The second survey determines the main feedback after a year of training in the *Polyaero* Aviation Maintenance Institute. First, the results of the verbatim studied [32] allow making criteria for each question.

For Question 1, all students combined (with and without previous experience in VR), it appears on the basis of the statistical analysis carried out (ANOVA) that the number of students differs significantly ($p \leq .01$) according to the criteria of new skills developed through VR lectures and projects. VR is the new skill most developed by students ($55.6\% \pm 9.1\%$). The second key skill

TABLE 2 Questions for Survey 2

Reference	Question
Q1	What new skills did you develop through the Virtual-Reality lectures and projects?
Q2	What are the added values of these Virtual-Reality sessions?
Q3	What are the advantages of Virtual-Reality compared with more traditional lessons?
Q4	What are the weaknesses of Virtual-Reality compared with traditional lessons?
Q5	After 1 year of training, does the student judge previous experience in Virtual-Reality as being sufficient to pass the training year?
Q6	After 1 year of training, does the student judge Virtual-Reality practices during the training year as being sufficient to improve skills in maintenance and maintainability?

Note: Students were asked for their individual feedback and opinions for the following questions.

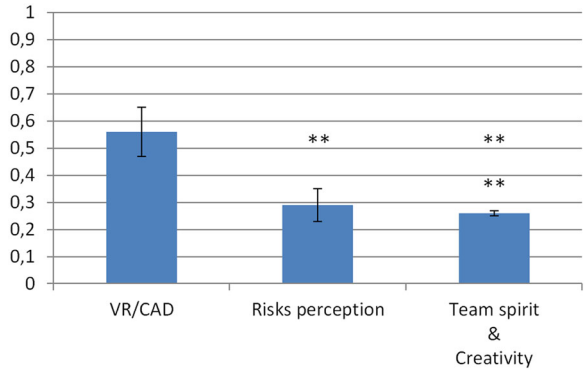


FIGURE 4 Distribution of criteria on average (±SD) for Question Q1 "What new key skills did you develop through Virtual-Reality lectures and projects?," all students combined ($n = 112$; $^{**}p \leq .01$)

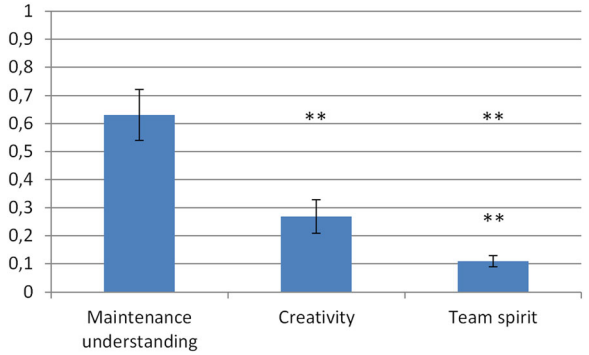


FIGURE 5 Distribution of criteria on average (±SD) for the question Q2 "What are the added values of these Virtual-Reality sessions?," all students combined ($n = 112$; $^{**}p \leq .01$)

is the perception of risks in maintenance (29.1% ± 6.2%). Team spirit and creativity are also two additional skills developed by students, without significant difference (26.4% ± 1.2%). Figure 4 details the results.

Figure 5 shows the results for Question 2, all students combined (with and without previous experience in VR), it appears on the basis of the statistical analysis carried out (ANOVA) that the number of students differs significantly ($p \leq .01$) according to the criteria of the main added values felt by students through VR lectures and projects. The maintenance understanding is the first criterion felt by students as the main added value after a year of VR training (63.4% ± 9.1%). Creativity is the second one (26.8% ± 5.9%). The last one is the team spirit criterion with 11.3% ± 1.7%.

For Question 3, all students combined (with and without previous VR experience), it appears on the basis of the statistical analysis carried out (ANOVA) that the number of students differs significantly ($p \leq .01$) according to the criteria of the main advantages felt by students through the VR lectures and projects compared with traditional lectures. The understanding of theoretical knowledge is the first main advantage cited compared with traditional lecture methods for 84.4% ± 6.2%. Motivation is also a criterion highlighted by students with 57.7% ± 8.6%. The last criterion is the efficient use of time to learn and understand the lecture (39.1% ± 4.4%). Figure 6 details the results.

Figure 7 details the results for Question 4, all students combined (with and without previous experience in VR), it appears on the basis of the statistical analysis carried out (ANOVA) that the number of students differs significantly ($p \leq .01$) according to the criteria of the main weaknesses felt by students through the VR lectures and projects compared with traditional lectures. The discrepancies and inaccuracies between VR and "the reality" of the real world is the first remark highlighted by students (55.3% ± 1.2%). The second remark is the transfer of date files from VR to CAD (35.8% ± 7.9%) comparing to the transfer from CAD to VR. The two last criteria, not presenting significant differences, are VR used as a gaming technology and the technical issues occurring with the use of VR platform (27.7% ± 5.4%).

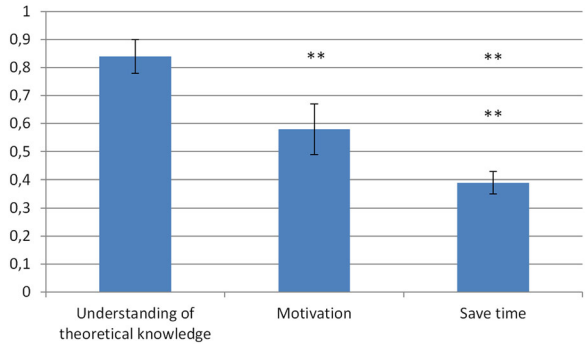


FIGURE 6 Distribution of criteria on average (±SD) for Question 3 "What are the advantages of Virtual-Reality compared with more traditional lessons?," all students combined ($n = 112$; $^{**}p \leq .05$)

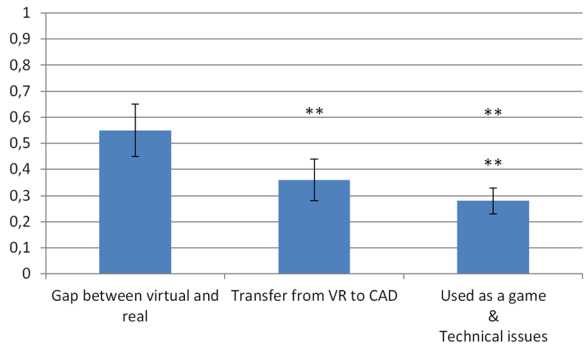


FIGURE 7 Distribution of criteria on average (±SD) for Question 4 "What are the weaknesses of Virtual-Reality compared with traditional lessons?," all students combined ($n = 112$; $^{**}p \leq .05$)

Table 3 shows the distribution of students with previous experience in VR and the responses of both Questions 5 and 6, respectively, if the students, after 1 year of training, judge if previous experience in VR was sufficient to pass the training year; and judge if VR practices during the training year as sufficient to improve skills in maintenance and maintainability. For Question 5, the results revealed that 17% of students with previous experience in VR judge their previous experience in VR as being sufficient to pass the training year. For Question 6, the results revealed that 29.4% of students with previous VR experience judge VR practices during the training year as being sufficient to improve skills in maintenance and maintainability. For both questions, *Fisher*'s exact test showed the statistically significant relationship between students with previous experience in VR and the responses to Questions 5 and 6. We can note that for all students without previous VR experience, 100% of them judge the training year as being sufficient to better understand VR and maintenance, as well as being sufficient to pass the final exam.

TABLE 3 The distribution of students with previous experience in VR and the responses of both Questions 5 (Q5) and 6 (Q6), respectively, if the students, after 1 year of training, judge previous experience in VR as being sufficient to pass the training year; and judge VR practices during the training year as being sufficient to improve skills in maintenance and maintainability

Q5***	(1), *n* (%)	(2), *n* (%)	(1) and (2), *n* (%)	No. (1) and no. (2), *n* (%)
	22 (19.6)	33 (29.5)	19 (17.0)	38 (33.9)
Q6**	**(1), *n* (%)**	**(3), *n* (%)**	**(1) and (3), *n* (%)**	**No. (1) and no. (3), *n* (%)**
	11 (9.2)	55 (49.1)	33 (29.4)	13 (11.6)

Note: *Fisher*'s exact test was used to test the relationship between (1) "previous VR experience" criteria, (2) previous VR experience as being sufficient to pass the full training year, and (3) virtual Reality practices during the training year has facilitated improved skills in maintenance and maintainability ($n = 112$; $^{**}p \leq .05$; $^{***}\ p \leq .01$).

To go further, we looked to identify the consideration of each criterion, whatever the question may be, for students with and without previous experience in VR (Figure 8). First of all, we noticed that inside the two categories there is a significant difference. VR is viewed as "a game" by 39% of students with previous experience in VR and 21.1% without previous experience in VR. Additionally, the transfer of 3D models from VR to CAD represents a weakness for 24.4% of students with previous experience in VR compared with 42.3% without previous experience in VR. For the rest of the criteria, there is no significant difference; however, we can observe that creativity, understanding of theoretical knowledge present a slightly higher percentage for students with previous experience in VR than without experience in VR. We also observed that the level of students judging VR as a time-saving tool is higher than students without previous experience in VR. Technical issues, as well as the discrepancies and inaccuracies between the virtual and the real, are also two criteria slightly higher for students without previous experience in VR.

5 | DISCUSSION

Our study has been conducted in a leading French Aviation Institute, *Polyaero* (Aix-Marseille University) where students are in their third and final year of a French Higher National Diploma in Aviation Maintenance. The particularity of this Institute is the teaching and training methods used, based on inductive and deductive approaches [13,34,36,37]. To efficiently apply this innovative way of learning, the digital tool, VR has been

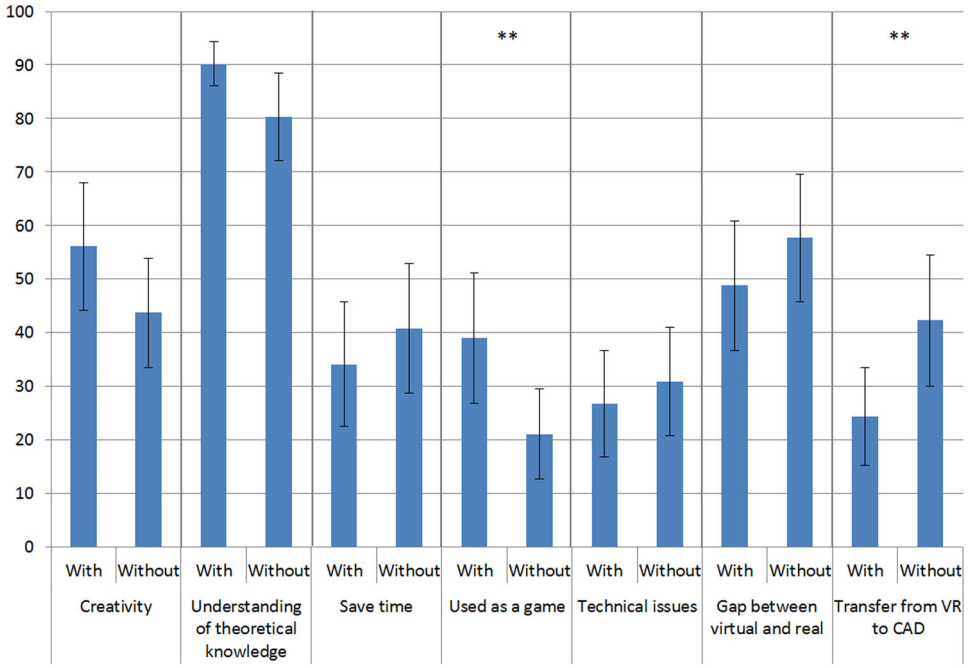


FIGURE 8 Average percentage of criteria highlighted by Verbatim methodology, whatever the question, between students with and without previous experience in VR. (**$p \leq .05$)

actively used for many years. VR is thus used not only as a teaching and training tool to enhance teaching methods and students' learning but also as a key digital tool for many technical aspects in the future in the aviation industry. Between 2018 and 2020, we have trained and observed 112 students. Two main surveys have been used, the first one at the beginning of the academic year (to better know the background of students) and the second one at the end of the training year (to get students' feedback about their training year, specifically relating to their VR lectures and projects). Our results show that all students combined (both those with and without previous experience in VR before starting the training), the principal new skill learned is key knowledge and skills of VR followed by the perception of risks in maintenance, followed by learning important aspects of team spirit and creativity. Thus, the training studied in this publication provides the first technical information to facilitate better use of VR, as well as understanding the advantages and limitations of VR. All students, learning with an inductive methodology [13], learn first the specific industrial case studies to better understand the advantages and benefits, as well as the limitations of using VR. These first results respond to the general observation, suggesting that VR is becoming more and more widely known and used in industry, even if VR is currently perceived and used more for marketing and collaborative reasons than having an impact on actual real-life technical issues [3,6]. Berg and Vance's study [6] investigates the use of VR in 18 different industries, showing that VR is well implemented in many Technical Design Offices to help make collaborative decisions but used by only a few specialists and not all the Design Office stakeholders. Thus, it is true to say that inside the same Design Office [7], there are very often various and varied perceptions between all maintainability stakeholders regarding the efficiency of VR. Additionally, the integration of Human Factors analysis in case studies provides the students the opportunity to realize the importance of understanding the risk of poor design during the first steps of the technical design process. The study of Morélot et al. [25] emphasizes the benefits of VR on the correct application and execution of procedures during fire safety training. Moreover, research has found that Human Factors analysis is in itself an educational act [15]. Indeed, it promotes the reflection of each stakeholder in the technical design office, both in analysis and in collaborative exchanges, for the purpose of optimizing solutions, in particular to find the compromises between technical criteria and human factors requirements based on common rules, in accordance with the work of Martin and Badarat [24].

However, *Fisher*'s exact test distinguished students with previous experience in VR and without previous experience in VR. The test explains that students with previous experience in VR considered their VR skills sufficient to pass the training in *Polyaero* but clearly considered this digital way of working as a key

contributor to better understand the maintenance task. Therefore, even if the students with previous experience in VR may question the relevance of the lectures about VR theory technics, they are convinced that VR is efficient to better understand its use through case studies. We recommend, at the beginning of the year to better test and asses students' previous experiences (or not) in VR, and to subsequently make two groups: students with significant previous experience in VR along with students without previous experience in VR. Each workgroup would be equally made up of students with and without previous experience in VR, to ensure an inclusive, cohesive, and positive group dynamic for all group members, regardless of their previous experience in VR.

Our results also show that, for all students combined, the added values of VR are first the improved understanding of a specific maintenance task, then creativity and team spirit. The immersion and the interaction with real industrial maintenance case studies have been perceived as really beneficial compared with traditional lectures. This particular observation has already been noted through lots of studies, showing that the student can manipulate without risk, learn better in a shorter time compared with a traditional lecture [21,24]. Additionally, other studies have investigated the potential of VR to improve creativity and cohesion within a working group [23,40]. These studies demonstrate that VR helps make students more relaxed, less stressed, offering an almost meditation-like environment, providing students better conditions to suggest new and fresh ideas. By using a personalized VR *Avatar,* each student further enhances their immersion and involvement in the virtual world. This in turn helps students to work together in a team, helping to improve their people skills as well as their leadership skills. Our observational trial is based on various maintenance scenarios with each student taking a different role and responsibility for collaborating (designer, maintenance documentation authoring, mechanics, ergonomics, 3D printing, VR manager). Our study, based on the previous research literature, highlights the advantages and benefits of VR in education and training to improve leadership skills, team spirit, creativity, and offer a better understanding of the specific maintenance activity, impracticable in the classroom. The research literature also shows that digital simulation technology like Augmented-Reality (AR) is also a teaching aid to develop creativity in an educational context [38].

For the students, the advantages of VR are identified in three categories, the first one is the understanding of the theoretical knowledge, the second one is the improved motivation and involvement, with the last one being the increased time efficiency. These correlated advantages are mentioned in the previous paragraph and confirm the efficiency of VR: improved understanding of the practice and execution of the maintenance task due to the inductive approach before the deductive [34,36,37]. VR is also a way to reduce the students' learning time and thus help avoid a lack of interest and boredom [2]. VR enables the student to be a willing and active participant in their own education. However, the disadvantages highlighted by students over 2 years are classified under four categories. The first remark is that the discrepancies and inaccuracies between virtual and reality are mainly due to the lack of physical interaction during the simulation test. This phenomenon is now well understood in the industry [7] but education must now better provide to the students wider visibility of VR uses and practices, its benefits and advantages as well as its limitations. The Institute has invested in a 3D printer to create physical parts in mixed-reality to improve activity-representativeness. In addition, a new software (*Skyreal*) has also been recently purchased to offer new functionalities that help to reduce the discrepancies and inaccuracies between the real and virtual worlds, such as clash/contact-detection with visual cues and controller vibration. One of the key factors for the next working generation is the adaptability and the autonomy to use digital technology. The second one is the transfer of data files from VR to CAD compared with the transfer from CAD to VR. Indeed, students prefer saving time and working more efficiently in correcting the 3D models, and being able to toggle instantly between the virtual world and a Computer Aid Design system to improve 3D modeling. The two last disadvantages are that VR is sometimes used as and viewed as "a game," as well as the technical issues that occur when using the VR platform. It is important to emphasize to students that using VR can provide real benefits in real-life work situations, by increasing and varying the number of real-life work



FIGURE 9 Students working with an Augmented-Reality headset

examples and industrial aviation maintenance case studies. However, even if our results are consistent, our study is only performed in an aviation context. This parameter might be a source of bias in our results, and it might be interesting to perform an extensive analysis through other industrial contexts. Further study is also required to better structure the lectures and find the best compromise between the teaching context and industrial context. Additionally, it will be necessary to assess the quality of the lectures and educators at the beginning of the year, preparing the use of VR studying in this paper.

6 | CONCLUSION

Our experimental results, and in relation to the previous research literature cited, lead us to propose some recommendations that will be applied to *Polyaero*'s future training courses and help us to improve the teaching context:

- Clearly clarify students with and without previous experience in VR. To stimulate students and working groups, each working group must have a mix of students with and without previous VR experience. The students with previous experience in VR can assist and encourage the students without VR experience. This assistance, in addition to teaching and training exercises, enables students to better synopsize and retain key information that in turn enhances their knowledge and skills.

- Inductive-Deductive approaches must be continuously applied and actively promoted to offer more cases studies and a better understanding of real-life work situations in aviation maintenance.
- Improve simulations by adding physical elements to help better synchronize the virtual and real worlds. The use of 3D-printed parts and 3D scanning of missing elements will be key to reduce discrepancies and inaccuracies between the virtual and real worlds.
- Actively support and promote new VR technology development making it readily available and easily accessible to students. The preparation time of 3D models in VR and all scenario preparation should be reduced. Add functionalities to VR software to simulate the handling of parts with real physical movements and behavior to improve the accuracy and realism of 3D representation. Improve 3D-parts-rendering to better immerse students in a virtual world.
- Support and encourage the use of new digital technology, such as AR, which is also becoming more and more widely used in technical aviation industries and education. The complementary aspects of using both VR and AR should be explored and applied. Figure 9 shows the first collaborative session performed by students in *Polyaero*.

In the near future, it will be necessary to assess new VR technologies that could apply theoretical lectures and use cases. In this frame, industrial collaboration must be perpetuated to keep a realistic approach to the learning path. [12]

ACKNOWLEDGMENTS

I express my deepest and sincere gratitude to all the students who participated in this experimentation. All the authors of this article have been involved in the design of the study, interpretation of the data, and writing of the manuscript. We certify that this paper has not been published, is not under consideration for publication, and will not be submitted elsewhere before your final decision.

CONFLICT OF INTERESTS

The authors declare that there is no conflict of interests.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

ORCID

Fabien Bernard http://orcid.org/0000-0003-1420-674X

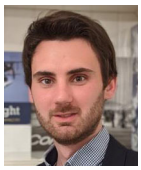
REFERENCES

1. A. B. Abdullah, M. H. Hasim, M. S. Yusoff, K. A. Wahab, and Z. M. Ripin, *Utilization of design for assembly guideline to enhance product maintainability*, J. Appl. Sci. **7** (2007), no. 21, 3234–3241.
2. S. Ahmed, *A review on using opportunities of augmented reality and virtual reality in construction project management*, Organ. Technol. Manag. Constr. **10** (2018), no. 1, 1839–1852.
3. M. Alcañiz, E. Bigné, and J. Guixeres, *Virtual reality in marketing: a framework, review, and research agenda*, Front. Psychol. **10** (2019), 1530.
4. A. Amundarain, D. Borro, L. Matey, A. G. Alonso, and T. de Guipúzcoa, *Occlusion culling for the visualization of aeronautical engines digital mock-ups*, Proceedings of Virtual Concept, Biarritz, 2003, pp. 5–7.
5. S. Aromaa and K. Vaananen, *Suitability of virtual prototypes to support human factors/ergonomics evaluation during the design*, Appl. Ergon. **56** (2016), 11–18.
6. L. P. Berg and J. M. Vance, *Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey*, Virtual Real. **21** (2017), no. 1, 1–17.

7. F. Bernard, M. Zare, J.-C. Sagot, and R. Paquin, *Using digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability*, Hum. Factors **62** (2020), 37–54. https://doi.org/10.1177/0018720819861496
8. F. Bernard, M. Zare, J.-C. Sagot, and R. Paquin, *Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability*, Hum. Factors Man. **29** (2019), 350–360. https://doi.org/10.1002/hfm.20792
9. G. Boothroyd and L. Alting, *Design for assembly and disassembly*, CIRP Ann. Manuf. Technol. **41** (1992), no. 2, 625–636.
10. Bradburn N. M., S. Seymour & W. Brian Asking questions: the definitive guide to questionnaire design–for market research, political polls, and social and health questionnaires. John Wiley & Sons; 2004.
11. O. Broberg, *Integrating ergonomics into engineering: empirical evidence and implications for the ergonomists*, Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind. **17** (2007), no. 4, 353–366.
12. D. W. Carruth, *Virtual reality for education and workforce training*, 2017 15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA), IEEE, October 2017, pp. 1–6.
13. W. Decoo, *The induction-deduction opposition: ambiguities and complexities of the didactic reality*, Int. Rev. Appl. Linguist. Lang. Teach. **34** (1996), no. 2, 95–118. https://doi.org/10.1515/iral.1996.34.2.95
14. G. Dubey, *Faire «comme si» n'est pas faire*, La Simulation en Ergonomie: connaître, agir et interagir, 1997, pp. 39–53.
15. B. Dugué, J. Petit, and F. Daniellou, *L'intervention ergonomique comme acte pédagogique*, Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé **12** (2010), no. 3.
16. L. E. Garza, G. Pantoja, P. Ramirez, H. Ramirez, N. Rodriguez, E. Gonzalez, R. Quintal, and J. A. Perez, *Augmented reality application for the maintenance of a flapper valve of a Fuller-Kynion type M pump*, Proc. Comput. Sci. **25** (2013), 154–160.
17. J. Geng, D. Zhou, C. Lv, and Z. Wang, *A modeling approach for maintenance safety evaluation in a virtual maintenance environment*, Comput. Aided Des. **45** (2013), 937–949.
18. A. Hobbs and A. Williamson, *Associations between errors and contributing factors in aircraft main-tenance*, Hum. Factors **45** (2003), no. 2, 186–201. https://doi.org/10.1518/hfes.45.2.186.27244
19. T. Horeman, K. Akhtar, and G. J. Tuijthof, *Physical simulators*, Effective training of arthroscopic skills, Springer, Berlin Heidelberg, 2015, pp. 57–69.
20. J. Jerald, *The VR book: human-centered design for virtual reality*, Morgan & Claypool, 2015.
21. S. Kavanagh, A. Luxton-Reilly, B. Wuensche, and B. Plimmer, *A systematic review of Virtual Reality in education*, Themes Sci. Technol. Educ. **10** (2017), no. 2, 85–119.
22. P. S. Kumar, K. S. Kumar, and N. N. Prasad, An approach to develop Virtual Reality Flight Simulator for combat aircraft cockpit evaluation (2018).
23. M. T. Y. Lin, J. S. Wang, H. M. Kuo, and Y. Luo, *A study on the effect of virtual reality 3D exploratory education on students' creativity and leadership*, Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ. **13** (2017), no. 7, 3151–3161.
24. C. Martin, and D. Baradat, *Des pratiques en réflexion*, Éditions Octarès, Toulouse, 2003.
25. S. Morélot, A. Garrigou, J. Dedieu, and B. N'Kaoua, *Virtual reality for fire safety training: influence of immersion and sense of presence on conceptual and procedural acquisition*, Comput. Educ. **166** (2021), 104145.
26. M. Okutsu, D. DeLaurentis, S. Brophy, and J. Lambert, *Teaching an aerospace engineering design course via virtual worlds: a comparative assessment of learning outcomes*, Comput. Educ. **60** (2013), no. 1, 288–298.
27. V. S. Pantelidis, *Virtual reality in the classroom*, Educ. Technol. **33** (1993), no. 4, 23–27.
28. J. C. Sagot, *Ergonomie et conception anthropocentrée*. 21 Document pour l'Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, 21, 1999.
29. J. H. Saleh, A. T. Ray, K. S. Zhang, and J. S. Churchwell, *Maintenance and inspection as risk factors in helicopter accidents: analysis and recommendations*, PLoS One **14** (2019), no. 2, 0211424. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211424
30. J. Savall, D. Borro, J. J. Gil, and L. Matey, *Description of a haptic system for virtual maintainability in aeronautics,* IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, IEEE, 2002, pp. 2887–2892.
31. A. Seth, J. M. Vance, and J. H. Oliver, *Virtual reality for assembly methods prototyping: a review*, Virtual Reality **15** (2011), no. 1, 5–20.
32. E. Singer and M. P. Couper, *Some methodological uses of responses to open questions and other verbatim comments in quantitative surveys*, Methods Data Anal. **11** (2017), no. 2, 115–134.
33. T. M. Smith, *Project Whirlwind: an unorthodox development project*, Technol. Cult. **17** (1976), 447–464.
34. L. K. Soiferman, *Compare and contrast inductive and deductive research approaches* (2010), online submission.
35. B. Strauch, *Investigating human error: incidents, accidents, and complex systems*, CRC Press, 2017.
36. S. Vogel, C. Herron, S. P. Cole, and H. York, *Effectiveness of a guided inductive versus a deductive approach on the learning of grammar in the intermediate-level college French classroom*, Foreign Lang. Ann. **44** (2011), no. 2, 353–380.
37. S. Wardani and I. W. Kusuma, *Comparison of learning in inductive and deductive approach to increase student's conceptual understanding based on international standard curriculum*, J. Pendidik. IPA Indones. **9** (2020), no. 1, 70–78. https://doi.org/10.15294/jpii.v9i1.21155
38. X. Wei, D. Weng, Y. Liu, and Y. Wang, *Teaching based on augmented reality for a technical creative design course*, Comput. Educ. **81** (2015), 221–234.
39. L. Xiyun, W. Xi, L. Chenchen, and W. Shaohua, *Application of virtual reality technology in nuclear power plant control room simulator*. International Conference on Nuclear Engineering, vol. 51432, American Society of Mechanical Engineers, July 2018, p. V001T04A004.
40. X. Yang, L. Lin, P. Y. Cheng, X. Yang, Y. Ren, and Y. M. Huang, *Examining creativity through a virtual reality support system*, Educ. Technol. Res. Dev. **66** (2018), no. 5, 1231–1254.
41. Y. Zou, L. Zhang, L. Dai, P. Li, and T. Qing, *Human reliability analysis for digitized nuclear power plants: case study on the LingAo II nuclear power plant*, Nucl. Eng. Technol. **49** (2017), no. 2, 335–341.

42. O. Čokorilo, *Aircraft performance: the effects of the multi attribute decision making of non time dependant maintainability parameters*, Int. J. Traffic Transp. Eng. **1** (2011), no. 1, 42–48.

AUTHOR BIOGRAPHIES



Fabien Bernard, Doctor in Human Factors engineering, is the referent in this field of maintainability department at Airbus Helicopters. He is also a research associate at the University of Bourgogne Franche-Comté, and a lecturer at POLYAÉRO Center and Aix Marseille University. He focuses his research on the integration of Human Factors/Ergonomics (HFE) in multidisciplinary collaborative environments, including digital tools.



Xavier Bonnardel, Doctor in Aerodynamics, is the referent of the aeronautical field at Aix Marseille University, Lt Colonel RC French Air Force, Director of the aeronautical training courses (Professional Licence Aeronautical industry and 10 DU Aeronautical), Founder of the training and research POLYAÉRO Center, in charge of the research activities Learning, Didactics, Evaluation, Training for the integration of the new technologies in the professional and didactic aeronautical practices.



Raphaël Paquin is Maintainability and Human Factors in maintenance expert within Airbus Helicopters. He has contributed since 2010 to the deployment of Virtual Reality for maintainability and ergonomic analysis for all new development within Airbus Helicopters; he provided his experience to build a VR Training course at POLYAÉRO Center in 2015.



Martial Petit is the ergonomics and innovation referent within the H175 and H160 final assembly lines of Airbus Helicopters France. He is also an intrapreneur and lecturer in ergonomics at the POLYAÉRO Center.



Killian Marandel, Technical Engineer, in charge of the 3D environment for the training and research POLYAÉRO Center.



Nicolas Bordin, Technical Engineer, in charge of virtual reality for the training and research POLYAÉRO Center.



Françoise Bonnardel, Master Research in Education Sciences, is the Director of Studies for aeronautical training (Professional Licence Aeronautical industry and 10 DU Aeronautical), Director of the training and research POLYAÉRO Center, involved in research activities on Learning, Didactics, Evaluation, Training for provision of training for the emergence of professional skills.

How to cite this article: F. Bernard, X. Bonnardel, R. Paquin, M. Petit, K. Marandel, N. Bordin, and F. Bonnardel, *Digital simulation tools in aviation maintainability training*, Comput. Appl. Eng. Educ. (2021), 1–12.
https://doi.org/10.1002/cae.22461

Augmented reality to perform human factors analysis in maintainability

Raphael Paquin

Airbus,
Aéroport International Marseille-Provence,
13725 Marignane, France
Email: Raphael.paquin@airbus.com

Fabien Bernard*

Airbus,
Aéroport International Marseille-Provence,
13725 Marignane, France
and
University of Technology of Belfort-Montbéliard
University of Bourgogne,
Franche-Comté, France
Email: fabien.bernard@airbus.com
*Corresponding author

Abstract: The simulation of maintenance activities is deployed within the industry to assess maintainability and human factors in preliminary aircraft architecture and design review. The use of augmented reality (AR) associated with a physical mock-up could be an alternative to other existing complementary simulations (virtual reality, physical mock-up alone). This paper introduces the first experiment with this hybrid simulation and the results of its performance. Through experimentation, we tested the ability of this solution to improve the design using the participants' feedback. This hybrid solution reduces the lead time in the development and decision process. It reduces the cost of the mock-up using only the basic shape of the model and tangible interfaces for the user. AR increases the details of the model, allows multiple configuration review and fosters collaboration between designers and project stakeholders.

Keywords: human factors; digital simulation; augmented reality; maintainability; maintenance; aviation; design office.

Reference to this paper should be made as follows: Paquin, R. and Bernard, F. (2023) 'Augmented reality to perform human factors analysis in maintainability', *Int. J. Human Factors Modelling and Simulation*, Vol. 8, No. 1, pp.76–95.

Biographical notes: Raphael Paquin is the maintainability and human factors maintenance expert within Airbus Helicopters. He has contributed since 2010 to the deployment of virtual reality for maintainability and ergonomic analysis for all new development within Airbus Helicopters. He provided his experience to build a VR Training course at POLYAÉRO Center in 2015.

Copyright © 2023 Inderscience Enterprises Ltd.

Fabien Bernard is a Doctor in Human Factors Engineering, and is the referent in this field of maintainability department at Airbus Helicopters. He is also a Research Associate at the University of Bourgogne Franche-Comté (ERCOS Research Group, ELLIADD Laboratory), and Lecturer at Aix Marseille University. He focuses his research on the integration of human factors/ergonomics (HFE) in multidisciplinary collaborative environments, including digital tools.

1 Introduction

In the European Helicopter industry, there are two main hazard areas in maintenance: on the one hand, helicopter airworthiness affecting flight safety; and on the other hand, health and safety affecting human performance and the comfort of the maintenance operators. According to the European Aviation Safety Agency (EASA), maintenance is the root cause of 6% of accidents in the helicopter field, representing the second source of hazards after pilot errors (Saleh et al., 2019). Additionally, 62% of operators in heavy industry consider maintenance to be a hard activity in terms of musculoskeletal disorders, time pressure, work organisation issues, etc. (AFIM, French Association of Maintenance engineers and Managers). The link between flight safety (reliability) and the human performance of maintenance operators is clearly established in the literature. Indeed, if the work conditions of maintenance operators are degraded (affecting physical ergonomics, organisational ergonomics, cognitive ergonomics) then the risk of errors increases (Lux et al., 2016; Hoyos-Ruiz et al., 2017; Bernard et al., 2021). To ensure maintenance is performed safely for both helicopters and maintenance operators, the maintainability discipline (Serghides and Fielding, 1987) must be considered in the design phases with a specific focus on the operator to assess human performance and human hazards. Indeed, the science of maintainability is defined as the ability of an item under given conditions of use, to be retained in, or restored to a state in which it can perform a required function, when maintenance is performed under given conditions (Zaki et al., 2019). Maintainability can influence the design, maintenance tools and maintenance procedures. This definition implies understanding the user to ensure an anthropocentric design. Thus, the integration of human factors and ergonomics (HFE) in the maintainability design process is one of the solutions, in order to anticipate future maintenance activity. According to the International Ergonomics Association (2000) HFE analysis aims to achieve "understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data, and methods to design in order to optimise human well-being and overall system performance". However, while design and new product development is ongoing, real maintenance activity cannot be observed and assessed without customer feedback. For this reason, simulating maintenance activity is considered the alternative solution (Michalos et al., 2018; Wolfartsberger, 2019). Plenty of studies have already explained the role and the performance of simulation tools during the design and development processes, particularly for maintenance activities (Aivaliotis et al., 2019; Mourtzis, 2020). In this context, a process was recently formalised and standardised (Bernard et al., 2020, 2022b) by the use of digital simulation tools. The use of simulation tools [digital human modelling (DHM), virtual reality (VR) and physical mock-up (PMU)] has mainly been

specifically studied as the support of human factor analysis in maintainability (Da Silva et al., 2020). In other words, this study considers the efficiency of each simulation tool and highlights the complementary features between each simulation tool. VR was identified as the best candidate to assess the main Human Factors criteria throughout the maintainability design process. The outcome of this research was included in the new industrial methodology allowing all maintainability stakeholders (and VT and human factor non-specialists) to efficiently use simulation tools across a short training protocol, in order to assess relevant HFE criteria (Bernard et al., 2022b). This protocol details the need to add main physical parts to the VR room environment, to synchronise the virtual and real worlds. For example, an operator working through a hatch will feel a real physical contact, providing constraints and limiting gestures. However, VR has demonstrated its limits in assessing some maintenance tasks on helicopters. To compensate for the lack of VR efficiency in this specific maintenance task analysis, augmented reality (AR) was proposed as an alternative solution. However, the use of an AR device is an arbitrary industrial choice, and does not provide certainty as to its relevance and efficiency for the maintenance task simulated. This use of main physical parts synchronised with the virtual world is essential to assess HFE, reproducing interaction, force, posture or physical constraints (Chen et al., 2014). Particularly to simulate maintenance tasks on a helicopter where physical accessibility is very complex with lot of contacts and limitations due to the tight space. Therefore, based on the industrial statement, we propose a scientific hypothesis: AR associated with the basic PMU (hybrid simulation) could be effective in assessing HFE during the simulation of maintenance tasks in aviation.

In this article, we will first introduce a context in aviation maintenance, particularly in our industrial maintainability case study. We will explain and develop the protocol deployed to study the AR tool used to assess Human Factors. The results will present the participants' feedback and statistical analysis comparing some indicators, before and after the design change proposal. We will then discuss our results regarding the literature in the same context.

2 Study context

To optimise the new product design anticipating the maintenance activity, many industries tried to train design stakeholders in maintainability benefits or develop a dedicated department, over a few decades. This department interfaces with all other design office departments like hydraulic and electrical integration, structure, aerodynamics, among others. The definition takes into account Human dimensions, through the HFE analysis, that must be integrated in the recommendations provided by maintainability departments. In other words, the main objective of the design office is to find the optimal compromise between mechanical and HFE criteria (Teymourian, 2021). However, to determine the optimal compromise with mechanical criteria, the Human Factors criteria must include objectives to provide input to the decision-making process. Indeed, for the most part, the design office stakeholders are specialised in mechanical design and not in human factor engineering (Broberg, 2010; Bernard et al., 2019). Therefore, the maintainability department must share and provide qualitative outcomes. In our case of study, we are in aviation maintainability, and more particularly in helicopter manufacturing. The maintainability department tries to anticipate the human

behaviour of future maintenance operators to reduce the impact on maintenance cost and safety. One of the main contributors to aviation maintainability is the ability to access all component candidates of a maintenance task. For example, we can impact the design of the hatches, the size of the footsteps and handles, or maintenance tools, among other criteria. Obviously, in order to minimise the risk of human hazards, maintainability studies need to be performed in the early phase of helicopter development before the design is frozen. Different methods and tools are available to verify and validate the design of the helicopter for the maintenance tasks that will be performed by customers. Mainly, the simulation of the activity is one of the best ways to really understand and anticipate the future maintenance activity during the design phases. Simulations need to provide objective and realistic evidence to properly assess maintenance and HFE criteria. Additionally, as maintainability is not the only criteria to consider, in addition to weight, performance and other safety features, we need collaborative means to interact with other stakeholders. More particularly in the development process, in order to highlight key issues that needs to be improved and also ensure that the work situation is representative, to make the correct decision. The following list groups the most common simulation tools used in maintainability and will provide their efficiency in detail later:

- DHM (Regazzoni and Rizzi, 2014)
- VR with digital avatar (Wang et al., 2019)
- PMU with maintenance operators (Roger et al., 2018).

We propose in the following paragraph to detail how each simulation tool is currently used, more specifically in the maintainability context. DHM and VR have been deployed and used for a decade in aviation maintainability, providing very good results and allowing for a better integration of HF criteria (Bernard et al., 2020). For example, it is an easy and efficient way to simulate the maintenance task of checking the oil level on the tail gear box (TGB) of the helicopter before the first flight of the day (Figure 1). The TGB is part of the transmission system which provides power to the helicopter tail rotor, the system includes gears that are lubricated and an oil level sight is used to check oil quantity to keep the helicopter safe. The designers are given specific constraints such as an inspection port in the cowling. The port design criteria include size, orientation and position and checking accessibility for a wide population base (anthropometric criteria) to ensure this task may be performed safely with limited effort for the operator.

Figure 1 TGB oil level check, from virtual simulation to real product to ensure maintenance feasibility (see online version for colours)

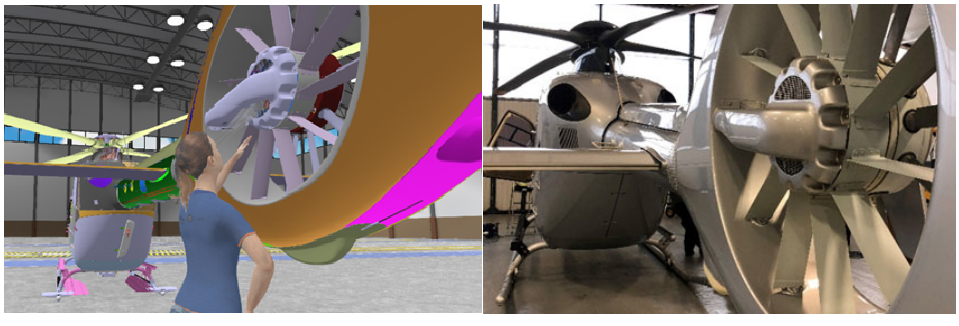


Figure 2 Limits of VR for complex use case involving vertical movement of the operator (see online version for colours)



Nevertheless, there is still a need to validate some hypotheses on a PMU for specific topics that cannot be simulated digitally for several reasons (Rauschnabel et al., 2022):

- complexity of the topic, depending on the number of physical interaction(s) with the environment that cannot easily be simulated in VR
- nature of the task involving the operator moving vertically, stepping between the ground and the engine deck, that could endanger safety (Figure 2).

Finally, even if solutions exist to overcome those limits in simulation tools such as a haptic device or tangible interfaces (Knöpfle and Voβ, 2000), to perform such simulations DHM and VR require special training and skills, and collaborative sessions will require several VR headsets (Rakkolainen et al., 2021).

Figure 3 Helicopter PMU in development phase (see online version for colours)



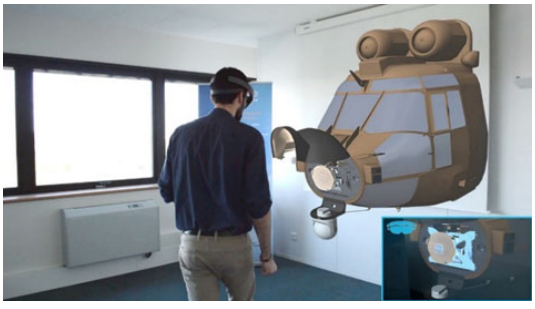
A PMU provides the operator with tangible interfaces with the real dimensions, mass and balance of fixed or moving components (Roger et al., 2018). This can be used to assess all the ergonomic dimensions (physical, cognitive and organisational) (Li et al., 2018), if weight is added to the mock-up and the overall mock-up is representative of the real environment (Aromaa et al., 2014). PMUs are frequently built in the helicopter development process to review some key mission capacities in the cockpit, cabin and to verify manufacturing or maintenance topics (Friedrich, 2021). The previous example

mentioned the simulation of vertical movement for assessing accessibility to the rotor area of the helicopter for the daily check; this is generally performed on a wooden mockup (Figure 3) during the early design phase.

A PMU generally does not require any training for the operators to perform HF assessment. The operator only requires a briefing for the purpose of the simulation and safety measures regarding risk of injury and work at height rules. Nevertheless, it takes a long time to manufacture the PMU and it is complex to modify it if a change is identified during a simulation or throughout the design phase (Webel et al., 2007). Using a PMU also requires special care to ensure it is representative for its targeted purpose, as manufacturing requires a significant lead-time (between 2 weeks for a small area to 3 months for a complete helicopter area). Details of the mock-up (e.g. harness, connectors, and small items) are often not included when compared to the DMU either because of manufacturing limitations or if the DMU is being updated (Webel et al., 2007).

For these reasons, AR has been identified as a potential solution to overcome the limits of existing simulation tools. When using AR, a digital layer is superimposed onto the physical world, integrating the physical, real environment with virtual elements to enhance or 'augment' the real-world experience (Leiber et al., 2021). This can be done using smartphones, tablets, smart glasses and other head-mounted displays (Papadopoulos et al., 2021). For a maintenance simulation use case, smart glasses or head-mounted displays are adapted to provide the user with a scale view of the model and the ability to interact with its hand and body in the virtual environment. The following figure shows the operator able to move and interact with a 3D model of a helicopter in the nose avionic bay to assess maintenance feasibility (Figure 4).

Figure 4 AR simulation (see online version for colours)



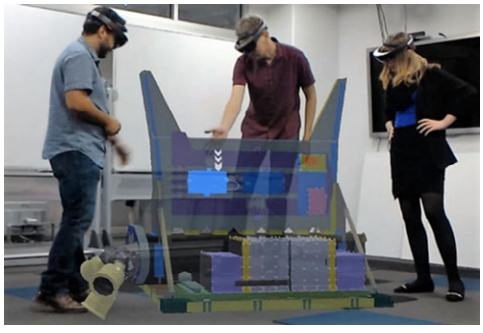
For a few years, AR devices have been evaluated and deployed in the aeronautics industry (De Crescenzio et al., 2010). AR devices are deployed in multiple areas for different use case types:

- providing instructions on the floor shop for manufacturing or maintenance (Safi et al., 2019)
- performing design review of a modified system on an existing physical aircraft (Obermair et al., 2020)
- providing remote assistance for customers or operators located in a different location (Rauschnabel et al., 2022)

- giving sales and marketing demonstrations to improve product perception (Wang and Qi, 2022).

The interaction capability of the AR device is different than with a VR set-up due to the absence of the physical controllers used in the gaming industry (game pad, joystick, etc.). It relies mainly on standard hand gestures (pinch, grasp, push, swipe), which occasionally limits the complexity and precision of the inputs. Nevertheless, it provides an easy solution for both engineers and workers giving a highly collaborative perspective. A key advantage of AR usage in the context of the design phase is the ability to invite several stakeholders and share the same understanding of a design and work situation in a collaborative mindset (Figure 5) (Kadir, 2020).This innovative approach is in line with the new working methods deployed in many industries in recent years (Khalek et al., 2019).

Figure 5 Collaboration review using AR device (see online version for colours)



In the context of a new development project, we had to specify, verify and validate a stepping concept definition to allow access to the engine and rotor area of a helicopter during a preflight check. This maintenance function allows the maintenance operators and flight crew to perform any daily check or servicing tasks on the aircraft using integrated handles and footsteps on the helicopter without the need for external access means. However, DHM, VR and PMU do not seem to be the best and most adequate simulation tools. So, the objective will be to explore the benefit of using AR to complete a simplified PMU in order to assess ergonomic and HFE criteria for maintenance tasks.

3 Observation

3.1 Method

As we explained previously, the constraints of this project do not allow us to use simulation means such as a complete PMU of the helicopter to assess the accessibility and HFE criteria. The cost and time involved in building such a detailed mock-up do not correspond to the development schedule. Moreover, we have seen the limits of such PMUs, such as small details that cannot be accurately reproduced and represented while remaining up-to-date with the latest design status. To overcome project constraints identified in the existing validation and verification means, the combination of AR and PMU was assessed to comply with deadline constraints and a more representative

simulation. This simulation will have to comply with a rigorous protocol with a representative sample of the world population performing this kind of maintenance task, with appropriate skills and observing objective criteria with regard to ergonomics, performance and safety.

3.2 Participants

The participants were selected for their anthropometric characteristics to get a representative sampling of the real population. The experience of the participants was also taken into consideration to include maintenance operators familiar with the tasks that will be simulated on similar helicopter types.

Some of the maintenance operators work in the prototype shop on similar helicopter types and regularly perform these tasks. There were 16 participants 42 (±7.8) years old, with an average height of 179 (±6.8) centimetres.

3.3 Means

An existing PMU of the cabin layout was adapted for the purpose of our simulation. Additional handles and steps were added to the external surface based on the characteristics of the preliminary design proposal. To complete the PMU with all necessary systems such as rotor, flight controls, drive system, engine and cowlings, an extract of the digital mock-up was made using the AR kit. The AR kit allows perfect alignment of both the digital and physical parts, allowing the operators to perform a simulation with the same accuracy and performance as on a real helicopter. Figure 6 shows that two AR devices were available:

- one for the operator performing the access and inspection check: seeing the 3D part overlaid over the PMU
- one for the ergonomic specialist to assess HF criteria, being able to move around the operator and talk with him about precise and detailed technical topics (ease of access, need to change the design, risk of injury or safety concerns).

Figure 6 Set-up of two connected AR devices to share same simulation and 3D models on the PMU (see online version for colours)



In addition to this AR set-up, an external large TV screen was connected to the AR device held by the operator, this enabled an audience to better understand the operator's point of view. Indeed, different stakeholders from the helicopter design office were invited to this simulation as a collaborative design review.

3.4 Indicators observed

Participants had to complete a preliminary survey to collect their anthropometric data and experience background. During the observation, they were asked to verbalise their perception of physical and visual access, balance and safety risks. At the end of the observation, each participant then completed a final survey to get the overall result of their performance of the task on selected indicators, based on a Likert scale (Joshi et al., 2015):, from 0 to 10 (0 being 'strongly disagree' and 10 being 'strongly agree').

- This task can be performed easily with a flashlight and a soft rag in hand.
- I am satisfied I performed the task correctly.
- I was able to access the task safely.
- It is safe to perform the inspection.
- The access position, posture and movement positions were comfortable.

During the observation, a human factors specialist identified all risks related to worker safety and potential errors that could lead to catastrophic consequences for the helicopter using a Cox Matrix (Gill, 2019). Any participant remarks and comments were also recorded at each step of the procedure; picture and video recording also help to perform further detailed analysis. The verbatim report (Lester et al., 2020) is used to make a transcription of the participants' comments made throughout the simulation. In our case, we are able to create categories of comments, check the occurrence according to the characteristics of the participants (height, background, etc.). A detailed analysis of results is provided in order to improve the design choice and improvement proposals.

Those indicators and the observed criteria were assessed using a hybrid mock-up combining PMU and AR and the results are similar to a real helicopter simulation.

3.5 Process and scenario

Two different areas of inspections were identified to check proper accessibility and ability to inspect all components of the helicopters:

- the main rotor area including the transmission system, the rotor and blades, the flight control and hydraulic system
- the engine area including the engine and all accessories.

Both areas need different access means such as steps and handle for the operator. A harmonisation of those access means was considered to reduce the number of steps and handles to minimise the weight impact.

Participants were invited in small groups of 5–6 people over the course of several days to ease the observation for both maintenance operators and human factors specialists. A safety briefing and introduction to the test with the context of the study was

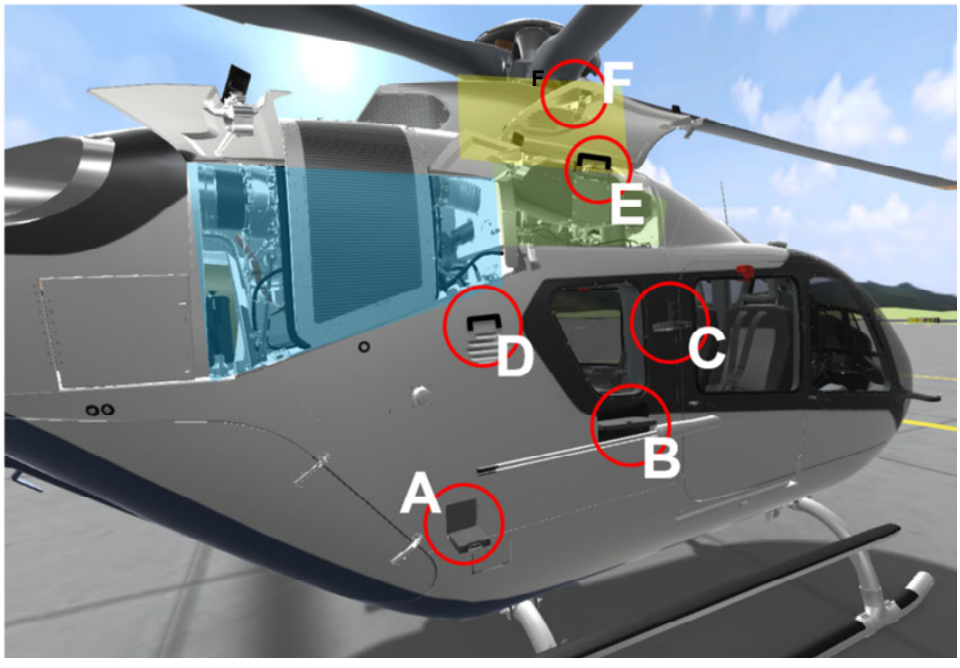
provided to avoid any accidents and ensure the understanding of the simulation goals. Then the operators completed the preliminary survey to ensure that the population was representative. The observation was then performed by a Human Factors specialist whose task was to assess the different objective criteria with each operator and to collect additional remarks such as balance and performance level. Pictures and video were taken during the entire simulation to enable data post-treatment. The operator and Human Factor specialist were provided with two AR kits for the simulation with a live streaming on a large screen beside the mock-up for all other participants.

We took the existing preflight maintenance tasks for a preflight on a similar helicopter as a reference for our study. All areas to be inspected and the sequence of the tasks were shown and described to all participants before the test started. Two kinds of tasks were simulated:

- accessibility to the rotor (yellow) to perform a visual inspection
- accessibility to the power plant (blue) and transmission (green) to perform a visual inspection.

This description included a detail of the steps and handles available to ensure that all attendees understood the task equally (Figure 7).

Figure 7 Helicopter system and access means (see online version for colours)



Notes: Rotor: yellow; power plant: blue; transmission: green.
Steps: A, B, C/handles: D, E, F.

To summarise, the chronology of the protocol was based on the following three main points:

1 sixteen participants, including maintenance operators familiar with the daily check on similar helicopters, were welcomed in little groups over several days

2 a preliminary survey was performed to collect participant background and anthropometric size

3 a final survey to assess overall participant performance and their feelings about safety (Likert scale).

We used the Mann-Whitney U statistical test to compare the participants (maintenance operators and design office stakeholders) for all questions. ANOVA was also used to compare, through the 5 questions, if there was a significant difference between the initial and new design proposal ($p < 0.05$ was accepted as statistically significant).

4 Results

Sixteen participants attended the test campaign, 31.3% (5 participants out of 16) were maintenance operators involved in daily checks on similar helicopter types and reproduced actions associated with everyday maintenance tasks. The other participants were stakeholders in the project with no preliminary experience in an operational maintenance activity, these participant stakeholders discovered for the first time how to access and perform inspections on the helicopter. Participant status almost complied with the initially expected targeted population. We initially identified a need to cover the widest part of the world population, starting from the 5th female percentile to 95th male percentile (French population considered). The shortest operator was 164 cm and the tallest operator was 191 cm. None of the participants had ever used an AR device before.

Firstly, we will study the difference between maintenance operators and design office stakeholders according to the score of the 5 questions. ANOVA shows that there is no significant difference (p-value > 0.5) between the participants, whether maintenance operators or design office stakeholders. The participants were not disturbed by the simulation tools and performed the task with the same perception.

We will summarise their feedback according to what each participant verbalised. The verbatim report allows us to make categories of clearly expressed remarks and recommendations. We divided the inspection into two main tasks:

1 accessibility to the rotor

2 accessibility to the power plant to perform a visual inspection, as detailed in the procedure.

The first feedback from participants highlighted two kinds of activities for each task:

- dynamic accessibility: operator climbing between the ground and the power deck, using footsteps and handles including opening the cowling
- static inspection: operator performing the visual inspection from the footsteps using the handle.

Table 1 and Table 2 show the results.

Table 1 Results of verbatim reports for the dynamic accessibility category

	Dynamic accessibility	
	Physical access/balance	*Footstep and handle positioning/sizing*
Accessibility to the rotor (yellow)	•Cowling can be reached, whatever the participant's height •Distance between steps A and B was too great for shorter participants •Handle D did not provide safe balance (expressed by 8 participants)	•Need to add an additional handle G, clearly expressed by 4 participants, with a risk of loss of balance •One footstep was not comfortable for tall participants (step D)
Accessibility to the power plant (blue) and transmission (green)	•Handle E was appropriate, particularly for tall participants •Distance between steps A and B was too great for shorter participants •Handle D was too far away	•Need to add an additional handle G.

Table 2 Results of verbatim reports for the static inspection category

	Static inspection (during visual inspection)		
	Comfort/balance	*Visual accessibility*	*Hand/head accessibility*
Accessibility to the rotor (yellow)	• Two participants felt they were falling backwards • Handle F was only used by tall participants	• Poor accessibility for shorter participants from step C.	• Poor physical accessibility for shorter participants from step C.
Accessibility to the power plant (blue) and transmission (green)	• Good feeling for all participants	• Transmission not ok for short participants • Handle D was adequate, short participants wanted to use it as a step.	• Handle D was adequate, short participants wanted to use it as a step.

Having such a representative population for this test supported the study result. We identified several design improvements to increase human performance and reduce hazards.

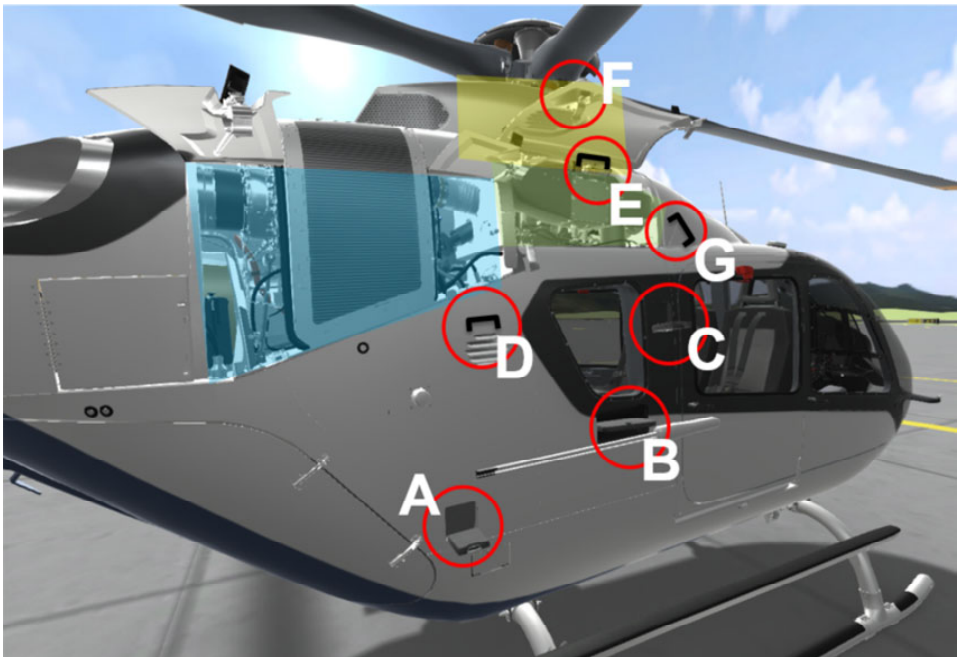
- reduced distance between steps A and B for short operators
- improved design of handle D to create a handle/step
- a new handle added for all operators to reach the rotor area (Handle G).

Figure 8 shows an example of an improved helicopter access means (compared with Figure 7).

The main outcome shows uniform feedback and a need for design improvements. Small operators faced issues (moving from steps A to B), due to the distance that was too large for their anthropometric data. All operators clearly identified the need to improve handle D to allow it to be used as a step to access the rotor area, the criteria raised for this

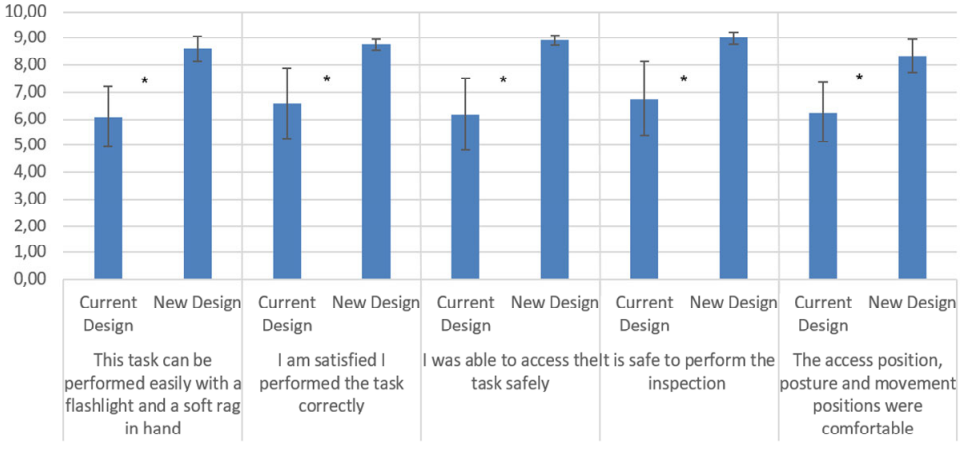
improvement were comfort and balance. We repeated the same experiment, adding handle G and the option for using handle D as a step to the PMU. The final survey was repeated twice, before and after the first recommendation. Figure 9 highlights the significant gap between each criteria assessed, before and after the design change.

Figure 8 Helicopter system and access means after analysis (see online version for colours)



Notes: Rotor: yellow; power plant: blue; transmission: green;
Steps: A, B, C/handles: E, F, G/step and handle: D

Figure 9 Comparison of the 5 questions, based on the Likert scale (from 0 to 10 – 0 being 'strongly disagree' and 10 being 'strongly agree'), before and after the design proposal; for all participants (p-value < 0.5) (see online version for colours)



An interpretation of the survey shows significant improvement in the safety and performance of the task (5 criteria of the final survey) when taking into account the additional handle (Figure 9).

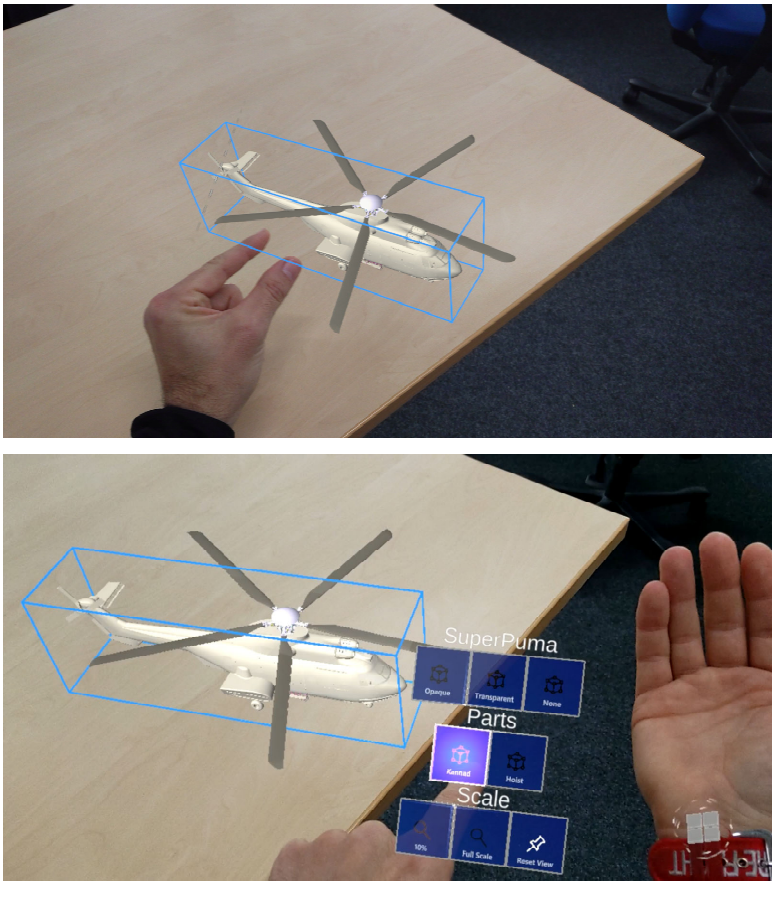
5 Discussion

The industrial experience in maintainability reveals some limits on the use of VR, particularly to simulate maintenance tasks. Indeed, for some maintenance tasks, VR does not allow the maintainability analysis efficiency and quality to be assessed while considering all dimensions of HFE in the design phases of a helicopter development. For this reason, the aviation industry tested AR associated with the basic PMU (hybrid simulation) as an alternative to VR. In our paper, we led experimentation to test our initial hypothesis, considering that the hybrid simulation could be effective in assessing HFE during the simulation of maintenance tasks in aviation. In order to identify whether the hybrid simulation is relevant in the maintainability case study, a robust protocol was built with a human factors specialist to define the objective criteria for the observation in order to provide design recommendations with objective criteria based on a representative population. Indeed, a group of 16 operators representative of the world population was identified, according to their qualifications and anthropometric data. Additionally, dedicated maintenance tasks were selected as relevant to the AR test. These maintenance tasks are not adapted to other simulation means like DDHM, VR and PMU alone, in the very early design phases. At the end of the observation, all recommendations were identified and discussed with the design office responsible based on the analysis of a human factors specialist. The most important design change recommendation was for an additional handle G identified based on all the operators' behaviour when grasping an area of the hybrid Mock-up that was not initially identified as a handle. As this additional handle will have an impact on weight for the helicopter design, we need strong arguments to ensure our recommendations are taken into account. This is why the collaborative way of working using the hybrid mock-up can be used to integrate these recommendations. The use of several AR kits together combined with the PMU allowed us to increase the accuracy of the simulation and reach a common understanding of the situation, risks and recommendations required. Other studies already show the efficiency of collaborative dimensions in maintainability through AR (Ababsa, 2020; Marques et al., 2021), however this kind of study did not take HFE criteria into account. This overall set-up was key to the collaborative aspect, providing every project stakeholder with consistent information at the same time and giving each operator and decision-maker consistent understanding of the issue. This meant that if the decision-maker was unable to understand an issue he could experience the check in person immediately. This feature was decisive for the success of such a project, and the integration of HFE and maintainability considerations in the design process. All stakeholders in this simulation and test campaign shared the same conclusions and decisions to improve the design on the aircraft and reached unanimous agreement without any doubt.

Another key success factor of this hybrid simulation was the lead time that allowed for such results, in less than 3 weeks we were able to achieve our goals instead of the two to three months required for a full scale and detailed mock-up. This aspect is essential for the integration of our recommendations in the design. Compared to previous verification and validation means (DHM, VR), the use of Mixed Reality combined with PMU has

unlocked several barriers in the efficiency of our analysis process. Simple PMUs, with no details, can be quickly built at low cost to provide only the tangible interface for the operators (main physical contacts). This lead time is key in the aeronautic development process as several systems are designed in parallel and must be studied by the maintainability department within a limited amount of time (Huang and Mak, 1997). Moreover, the helicopter design and architecture changes and evolves every day in the early phase of its development (Carlile, 2004), to refine assumptions, consider all stakeholders and assess criteria for trade-offs (Bernard et al., 2019).

Figure 10 AR user interfaces (see online version for colours)



The cost and lead-time required to build a PMU is directly related to the level of detail required. Indeed, reducing the cost of the manufacturing process is also a key aspect in avoiding continuous updates of the PMU to keep it aligned with the Digital Mock-Up (Bernard et al., 2020) or to perform trade-offs by comparing two design solutions in the same simulation. Rapid Manufacturing processes have been improved in the last years (3D printing) and it can be used in our industrial context (Bernard et al., 2022a). However, a huge effort is required, for limited benefit, to reach a level of detail with all mechanical functionalities (moving parts, different colours for each system, harness and very small item). As a result of AR, this state can be easily managed. The 3D image,

providing all details from the most recent digital mock-up status model, is superimposed onto the PMU during the simulation.

In accordance with the literature (Bottani and Vignali, 2019; Gattullo et al., 2019), AR devices were developed by a major digital company and the user interface was one of the main criteria to ensure its success and acceptance level in all areas from the office to the workshop. AR devices and software do not require intense training (Karagozlu et al., 2019), control is achieved by pushing virtual buttons with fingers or using the hand to grasp a 3D hologram (Figure 10).

In addition, one of the main assets is the collaborative aspect. AR devices allow several users to see the same data and discuss technical topics without the need to remove the device. All users are able to understand the operator task and explain via another AR device or by display on a large screen in the room. This ability to see the same data as other stakeholders ensures the success of the action plan defined in the simulation, none of the required changes were challenged after these sessions, as compared to previous experiences in the past using conventional approaches. Some studies highlighted that AR provided efficient collaboration leading to a better global understanding between all stakeholders, whatever their field (industry, education, medicine, maintenance, etc.) (Pidel and Ackermann, 2020; Kerr and Lawson, 2020; Sereno et al., 2020). All these studies expressed that stakeholders work faster and more efficiently to innovate no matter what the field studied, for mechanical products, procedures or education methodologies, among others.

To summarise the benefits, with regard to our results and the literature, in our case of study of aviation maintainability, an AR device was used to simulate a maintenance activity that VR could not simulate effectively. The AR device allowed us to work faster, with meaningful qualitative and quantitative results and meaningful outcomes. Indeed, the design recommendations were collectively approved to optimise the design, in a fully collaborative way.

However, some limits of the study were identified:

- The population that attended our simulation allowed us to identify the main risks and provide recommendations. However the process was not performed in operational working conditions with potential external influences on their performance, such as time pressure, poor environmental conditions, fatigue or stress. Such factors are difficult to reproduce and we worked on the assumption of optimal conditions to allow for proper comparison between each participant over time. We also need to improve the representative configuration of the aircraft, to show the cowlings opened or closed, to display potential optional equipment such as a hoist or searchlight that could affect accessibility.
- The simulation means capacity also showed some limits to this study. Operator ability to interact with a 3D model to simulate a removal/installation of a component or a cowling opening was not facilitated by the mixed reality device. Clash detection between operators and the 3D model where it was not possible to detect a potential risk of injury.
- The mixed reality devices used during the simulation were not fully connected together, requiring higher preparation time to perfectly align the 3D model on the mock-up on both mixed reality devices.

- Finally, the remaining limit was the PMU that needed to be adapted or modified to consider potential recommendations, that will lead to additional delay in updating and completing the study with a final check for verification of the performance.

Globally, this new approach changed the way we collaborate with the design office to assess maintainability and HFE criteria.

Perspective of the study can be grouped in two categories:

- Efficiency and accuracy of the analysis: To improve the efficiency and accuracy of such a simulation, we could combine a motion capture capability to track operator movement with the AR kit. This would provide the Human Factors specialist with a live analysis of posture and allow the activity to be recorded, to refine the ergonomic indicators. Such detailed results could ensure we comply with relevant ergonomic standards and reduce the risks to operator health and safety.
- Integration in a streamlined process to facilitate digital connection and iteration loop: To improve the integration of such simulations in the design process, we could provide features in the AR kit to interact with the digital mock-up and send those proposals back to the design office, ensuring a more accurate reporting and reducing exchange loops with designers. The PMU needs also to be easily reconfigurable to allow for reduced iteration loops to reassess the criteria after recommendations are implemented.

6 Conclusions

In recent years the aviation industry has entered a new era of complex challenges. The market is evolving fast, competitiveness modifying industry leadership models and safety have all become a priority, along with many other criteria. The industry needs to improve its productivity, efficiency, collaboration and to raise its standards to a higher level, to cope with various contradictory constraints. This also applies to the design office maintainability department, which must consider maintenance in the development of new helicopters.

We identified the limits of existing ways of working to perform maintenance simulation using the PMU, digital mock-up or VR. Even if these still provide value individually, we proposed a new approach to combine simplified PMUs and AR in the context of an accessibility check for daily inspection of a helicopter.

Using a robust protocol combining a representative population and objective ergonomic and HFE criteria, led by a Human Factors specialist and supported by a simplified wood mock-up built in two weeks, we assessed the value of AR to complete the simulation with all details of the digital mock-up. We used this collaborative session between operators, Human Factors specialists and designers to validate the design and identify potential risk and mitigation with a higher degree of accuracy, reduce lead-time and cost with better confidence between each stakeholder.

The limits of the study were identified to work on method and tool improvement and perspectives were discussed to prepare for safer helicopter maintenance operation in the future.

References

Ababsa, F. (2020) 'Augmented reality application in manufacturing industry: maintenance and non-destructive testing (NDT) use cases', in *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Springer, Cham., September, pp.333–344.

Aivaliotis, P., Georgoulias, K. and Alexopoulos, K. (2019) 'Using digital twin for maintenance applications in manufacturing: State of the Art and Gap analysis. In 2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC), June, IEEE, pp.1–5.

Aromaa, S., Viitaniemi, J., Helin, K. and Vento, A. (2014) 'Ergonomic evaluation of cab design employing digital and physical mock-ups', *Advances in Ergonomics In Design, Usability & Special Populations*, Part I, Vol. 16, p.410.

Bernard, F., Bonnardel, X., Paquin, R., Petit, M., Marandel, K., Bordin, N. and Bonnardel, F. (2022a) 'Digital simulation tools in aviation maintainability training', *Computer Applications in Engineering Education*, Vol. 30, No. 2, pp.384–395.

Bernard, F., Paquin, R., Devilliers, G. and Zare, M. (2022b) 'Methodology proposal to better integrate human factors in aviation maintenance', paper presented at *Vertical Flight Society's 78th Annual Forum and Technology Display*, Dallas, USA.

Bernard, F., Zare, M., Murie, C. and Sagot, J-C. (2021) 'Dimensions physiques et cognitives: vers une nécessaire prise en compte en maintenabilité aéronautique', *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, https://doi.org/10.1016/j.admp.2020.10.004.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C. and Paquin, R. (2019) 'Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability', *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, Vol. 29, No. 4, pp.350–360.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C. and Paquin, R. (2020) 'Using digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability', *Human Factors*, Vol. 62, No. 1, pp.37–54.

Bottani, E. and Vignali, G. (2019) 'Augmented reality technology in the manufacturing industry: a review of the last decade', *IISE Transactions*, Vol. 51, No. 3, pp.284–310.

Broberg, O. (2010) 'Workspace design: a case study applying participatory design principles of healthy workplaces in an industrial setting', *International Journal of Technology Management*, Vol. 51, No. 1, pp.39–56.

Carlile, P.R. (2004) 'Transferring, translating, and transforming: an integrative framework for managing knowledge across boundaries', *Organization Science*, Vol. 15, No. 5, pp.555–568.

Chen, K.B., Kimmel, R.A., Bartholomew, A., Ponto, K., Gleicher, M.L. and Radwin, R.G. (2014) 'Manually locating physical and virtual reality objects', *Human Factors*, Vol. 56, No. 6, pp.1163–1176.

Da Silva, A.G., Winkler, I., Gomes, M.M. and Pinto, U.D.M. (2020) 'Ergonomic analysis supported by virtual reality: a systematic literature review', in *2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR)*, November, IEEE, pp.463–468.

De Crescenzio, F., Fantini, M., Persiani, F., Di Stefano, L., Azzari, P. and Salti, S. (2010) 'Augmented reality for aircraft maintenance training and operations support', *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 31, No. 1, pp.96–101.

Friedrich, M. (2021) 'Human machine interface design to support safety risk monitoring of autonomous small unmanned aircraft systems–results from a mock-up evaluation', in *2021 IEEE/AIAA 40th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, IEEE, pp.1–7.

Gattullo, M., Scurati, G.W., Fiorentino, M., Uva, A.E., Ferrise, F. and Bordegoni, M. (2019) 'Towards augmented reality manuals for industry 4.0: a methodology', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 56, pp.276–286.

Gill, S. (2019) 'Use of human hazard analysis to enhance resilient performance of helicopter maintenance systems', in *REA Symposium on Resilience Engineering Embracing Resilience*.

Hoyos-Ruiz, J., Martínez-Cadavid, J.F., Osorio-Gómez, G. and 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)*, Vol. 11, No. 2, pp.263–277.

Huang, G.Q. and Mak, K.L. (1997) 'The DFX shell: a generic framework for developing design for X tools', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp.271–280.

Joshi, A., Kale, S., Chandel, S. and Pal, D.K. (2015) 'Likert scale: explored and explained', *British Journal of Applied Science & Technology*, Vol. 7, No. 4, p.396.

Kadir, B.A. (2020) *Designing New Ways of Working in Industry 4.0: Aligning Humans, Technology, and Organization in the Transition to Industry 4.0*, Thesis dissertation.

Karagozlu, D., Kosarenko, N., Efimova, O. and Zubov, V. (2019) 'Identifying students' attitudes regarding augmented reality applications in science classes', *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, Vol. 14, No. 22, pp.45–55.

Kerr, J. and Lawson, G. (2020) 'Augmented reality in design education: landscape architecture studies as AR experience', *International Journal of Art & Design Education*, Vol. 39, No. 1, pp.6–21.

Khalek, I.A., Chalhoub, J.M. and Ayer, S.K. (2019) 'Augmented reality for identifying maintainability concerns during design', *Advances in Civil Engineering*.

Knöpfle, C. and Voβ, G. (2000) 'An intuitive VR user interface for design review', in *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pp.98–101.

Leiber, D., Tanz, L. and Reinhart, G. (2021) 'Augmented reality in der Montagetechnik/augmented reality in assembly technology', *wt Werkstattstechnik online*, Vol. 111, No. 3, pp.130–135.

Lester, J.N., Cho, Y. and Lochmiller, C.R. (2020) 'Learning to do qualitative data analysis: a starting point', *Human Resource Development Review*, Vol. 19, No. 1, pp.94–106.

Li, Y., Yu, R., Zhang, L., Lages, W.S. and Bowman, D.A. (2018) 'Climb, direct, stack: smart interfaces for ELeague contest', in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp.852–853, IEEE.

Lux, A., Mawo De Bikond, J., Etienne, A. and Quillerou-Grivot, E. (2016) 'FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems', *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, Vol. 22, No. 4, pp.557–564.

Marques, B., Silva, S., Rocha, A., Dias, P. and Santos, B.S. (2021) 'Remote asynchronous collaboration in maintenance scenarios using augmented reality and annotations', in *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, March, IEEE, pp.567–568.

Michalos, G., Karvouniari, A., Dimitropoulos, N., Togias, T. and Makris, S. (2018) 'Workplace analysis and design using virtual reality techniques', *CIRP Annals*, Vol. 67, No. 1, pp.141–144.

Mourtzis, D. (2020) 'Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends', *International Journal of Production Research*, Vol. 58, No. 7, pp.1927–1949.

Obermair, F., Althaler, J., Seiler, U., Zeilinger, P., Lechner, A., Pfaffeneder, L., Richter, M. and Wolfartsberger, J. (2020) 'Maintenance with augmented reality remote support in comparison to paper-based instructions: experiment and analysis', in *2020 IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, IEEE, pp.942–947.

Papadopoulos, T., Evangelidis, K., Kaskalis, T.H., Evangelidis, G. and Sylaiou, S. (2021) 'Interactions in augmented and mixed reality: an overview', *Applied Sciences*, Vol. 11, No. 18, p.8752.

Pidel, C. and Ackermann, P. (2020) 'Collaboration in virtual and augmented reality: a systematic overview', in *International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics*, Springer, Cham., September, pp.141–156.

Rakkolainen, I., Farooq, A., Kangas, J., Hakulinen, J., Rantala, J., Turunen, M. and Raisamo, R. (2021) 'Technologies for multimodal interaction in extended reality—a scoping review', *Multimodal Technologies and Interaction*, Vol. 5, No. 12, p.81.

Rauschnabel, Philipp, A., Babin, B.J., Dieck, M.C.T., Krey, N. and Jung, T. (2022) 'What is augmented reality marketing? Its definition, complexity, and future', *Journal of Business Research*, Vol. 142, pp.1140–1150.

Regazzoni, D. and Rizzi, C. (2014) 'Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability', *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 11, No. 1, pp.10–19.

Roger, M., Vignais, N., Ranger, F. and Sagot, J.C. (2018) 'Ergonomic testing for the design of an innovative mail delivery vehicle: a physical mock-up case study', *International Journal of Ergonomics*, Vol. 8, No. 2.

Safi, M., Chung, J. and Pradhan, P. (2019) *Review of Augmented Reality in Aerospace Industry*, Aircraft Engineering and Aerospace Technology.

Saleh, J.H., Tikayat Ray, A., Zhang, K.S. and Churchwell, J.S. (2019) 'Maintenance and inspection as risk factors in helicopter accidents: analysis and recommendations', *PloS One*, Vol. 14, No. 2, p.e0211424.

Sereno, M., Wang, X., Besançon, L., Mcguffin, M.J. and Isenberg, T. (2020) 'Collaborative work in augmented reality: a survey', *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*.

Serghides, V.C. and Fielding, J.P. (1987) 'A maintainability prediction methodology for use in aircraft design', *International Journal of Quality & Reliability Management*.

Teymourian, K. (2021) *Integrating Ergonomics in Maintainability Design Process*, Doctoral dissertation, Luleå University of Technology.

Wang, J. and Qi, Y. (2022) 'A multi-user collaborative AR system for industrial applications', *Sensors*, Vol. 22, No. 4, p.1319.

Wang, M., Li, Y., Lyu, C. and Liu, X. (2019) 'A development and application of maintainability evaluation system using immersive VR', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, Vol. 658, No. 1, p.012011.

Webel, S., Becker, M., Stricker, D. and Wuest, H. (2007) 'Identifying differences between cad and physical mock-ups using AR', in *2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, IEEE, pp.281–282.

Wolfartsberger, J. (2019) 'Analyzing the potential of virtual reality for engineering design review', *Automation in Construction*, Vol. 104, pp.27–37.

Zaki, R., Barabadi, A., Qarahasanlou, A.N. and Garmabaki, A.H.S. (2019) 'A mixture frailty model for maintainability analysis of mechanical components: a case study', *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Vol. 10, No. 6, pp.1646–1653.

A new approach for human factors integration into design for maintenance: a case study in the aviation industry

Fabien Bernard*

Airbus,
Marignane, France
Email: fabien.bernard@airbus.com
and
University of Technology of Belfort-Montbéliard,
Rue de Leupe, 90400 Sevenans, France
and
University of Bourgogne Franche-Comté,
32 Av. de l'Observatoire, 25000 Besançon, France
*Corresponding author

Mohsen Zare

University of Technology of Belfort-Montbéliard,
Rue de Leupe, 90400 Sevenans, France
and
University of Bourgogne Franche-Comté,
32 Av. de l'Observatoire, 25000 Besançon, France
Email: mohsen.zare@utbm.fr

Raphael Paquin

Airbus,
Marignane, France
Email: raphael.paquin@airbus.com

Jean-Claude Sagot

University of Technology of Belfort-Montbéliard,
Rue de Leupe, 90400 Sevenans, France
and
University of Bourgogne Franche-Comté,
32 Av. de l'Observatoire, 25000 Besançon, France
Email: jean-claude.sagot@utbm.fr

Abstract: In the aviation maintenance industry, human factors/ergonomics (HFE) is increasingly considered by maintainability stakeholders in the aircraft development process. However, most of the stakeholders are not specialised in HFE, therefore the compromise between HFE and design criteria is not optimised. This paper has three main objectives. The first is to explain the

Copyright © 2023 Inderscience Enterprises Ltd.

limits already observed about integrating HFE into engineering design and design for maintenance. Based on this state, the second objective is to detail the design of a new approach called preliminary ergonomics analysis in maintainability (PEAM) to enhance integration of HFE in aviation maintenance by maintainability stakeholders with little or no HFE skills or knowledge. The last objective will present the results on the effectiveness of the PEAM implementation, comparing the situation before and after PEAM integration. Results show that the HFE is more efficiently integrated, with improvement in the simulation tools used.

Keywords: human factors and ergonomics; HFE; maintainability; maintenance; aviation; helicopters; design office

Reference to this paper should be made as follows: Bernard, F., Zare, M., Paquin, R. and Sagot, J-C. (2023) 'A new approach for human factors integration into design for maintenance: a case study in the aviation industry', *Int. J. Human Factors and Ergonomics*, Vol. 10, No. 2, pp.144–164.

Biographical notes: Fabien Bernard is a Doctor in Human Factors Engineering, is the referent in this field of maintainability department at Airbus Helicopters. He is also a research associate at the University of Bourgogne Franche-Comté (ERCOS Research group, ELLIADD Laboratory), and a lecturer at Aix Marseille University. He focuses his research on the integration of Human Factors/Ergonomics (HFE) in multidisciplinary collaborative environments, including simulation digital tools.

Mohsen Zare is an Associate Professor with the accreditation to direct research (HDR) at the University of Bourgogne Franche-Comté (ERCOS Research group, ELLIADD Laboratory). He teaches in the Department of Ergonomics, Design, and Mechanical Engineering (EDIM).

Raphael Paquin is Maintainability and Human Factors in maintenance expert within Airbus Helicopters. He has contributed since 2010 to the deployment of Virtual Reality for maintainability and Human Factors analysis for all new development within Airbus Helicopters. He provided his experience to build a VR training course at POLYAÉRO Center in 2015.

Jean-Claude Sagot is a University Professor Emeritus at the University of Bourgogne Franche-Comté (ERCOS Research Group, ELLIADD Laboratory), previously the Head of the research team of Ergonomics and System Design at UTBM in the University of Bourgogne Franche-Comté. He teaches in the Department of Ergonomics, Design, and Mechanical Engineering (EDIM).

1 Introduction

In aviation, human factors and ergonomics (HFE) has been focusing for decades on improving cockpit design (Horeman et al., 2015). However, the aviation industry perceives maintenance as a sensitive activity due to HFE issues, representing the second cause of all aviation accidents (Hobbs, 2000; Saleh et al., 2019). Indeed, maintenance is the causal factor in 14% to 21% of helicopter accidents for the US civil fleet (Saleh et al., 2019). One of the causes could be the difficulty for operators to perform maintenance due to the complex environment. For example, studies have already shown that maintenance

operators consider maintenance to be a hard activity. The French Association of Maintenance Engineers (AFIM, 2004) surveyed 2,500 maintenance operators from various sectors (including aeronautics) in which 62% of respondents considered their occupation to be dangerous. Preserving the health and improving the safety of maintenance operators remain major issues in aviation. These questions are all the more relevant in aviation where recommendations and regulations impose regular maintenance rhythms, in order to ensure compliance with the norms and standards [International Civil Aviation Organization (ICAO); Air Transport Association of American (ATA)] in force to optimise safety. Additionally, the maintenance activity is very expensive, amounting to between 23% and 25% of total airline costs per year (Čokorilo, 2011). There is a need to improve operator working conditions in order to reduce risks of error.

One of the ways would be to improve maintenance design in the design office to anticipate the future maintenance activity. The maintainability department (part of the design office) is trying to better integrate HFE within the design process to improve the maintenance of future aircraft (Gruber et al., 2015). Taking into account HFE is complicated because most maintainability stakeholders do not have sufficient knowledge of HFE and the HFE specialist is often absent throughout the design process (Bernard et al., 2019a). In general, literature has already highlighted and identified the gap in knowledge about integrating HFE into engineering design. It seems that the integration and implementation of HFE has faced challenges in various industrial contexts, despite all the studies and work being conducted around this issue (Kirwan, 2000; Waterson and Kolose, 2010; Rae et al., 2020). Obvious gaps can be seen in the way the HFE has been implemented, its achievements, its effectiveness, and the procedure for evaluating the outcomes (Teperi et al., 2023). Broberg (2007) analysed 20 different industries, including electronic, chemical and construction industries, and found that lack of time, and insufficient knowledge of the working environment and methods/tools, were the main barriers to integrating HFE into their practice, particularly methods/tools already known but underused by design stakeholders. The stakeholders often have an idea about HFE elements and proceed based on this idea without trying to study it. They adopt tools to achieve progress in the design solution but concentrate less on the analysis of the consequences of their design choices on the health/safety of the operators and the efficiency of man-machine interaction. Teperi et al. (2023) concluded in their study among aviation and railway companies that HFEs need to be integrated into organisational practice based on specific procedures to address any social/organisational barriers and achieve the objectives of working safely. Waterson and Kolose (2010) proposed an HFE implementation framework as a way to plan strategies for improving HFE integration that could overcome social/organisational constraints. Additionally, some guidelines, like ergonomic work analysis (EWA), have already been developed to help design engineers to improve integration of HFE. This methodology has been improved to be adapted to non-HFE specialists in design offices (Da Conceição et al., 2020). Authors state that, lacking skills in HFE, design office stakeholders have transformed and adapted the final results, mainly by misunderstanding how to deploy the methodology, associated with a wrong interpretation of the results. Other studies have defined the role of boundary objects to help designers make a better decision about HFE (Broberg et al., 2011; Andrews et al., 2019). The boundary objects can be simulation tools already used by design engineers (3D models, wooden mock-ups, etc.), but for design review purposes and not for HFE analysis (Mourtzis, 2020; Lo et al., 2021). In maintainability, previous studies have recommended using digital human modelling

(DHM) and physical simulation tools as useful devices to optimise the balance between HFE principles and design criteria (Amundarain et al., 2003; Di Gironimo et al., 2004; Nishanth et al., 2015; Shi and Liu, 2012). However, the use of these simulation tools needs skills, knowledge, and rigorous methodologies. These simulation technologies are often used more by intuition rather than by expertise, and do not capitalise on the full potential of this technology. The question is whether an organisational procedure could be a solution to improve the use of simulation tools and improve the integration of HFE within the maintainability department of the helicopter manufacturing industry. It is evident from the previous studies that the implementation of HFE needs to be established based on an explicit approach at different organisational levels, with clear indicators to monitor the results of this implementation. In the current practice of maintenance design in the maintainability department, the need for an organisational approach to integrate HFE has been raised (Bernard et al., 2019a).

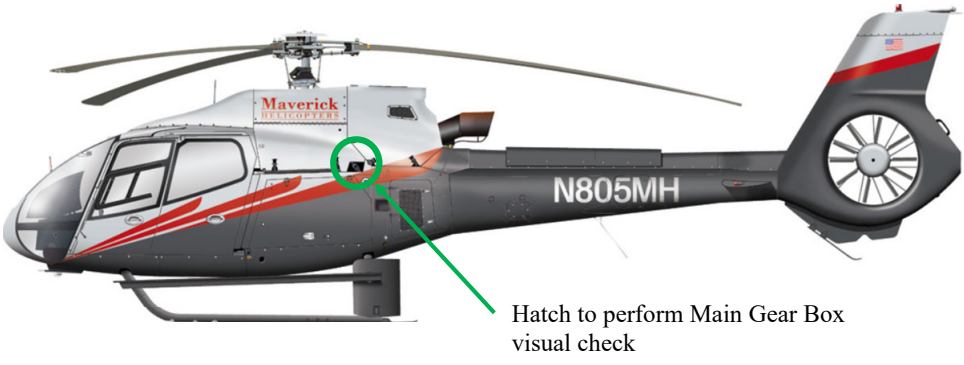
The aim of this article is therefore to propose an innovative approach for the integration of HFE, and to follow up its implementation in an industrial context, while considering the pros and cons. We will first present a brief background and the problems encountered in aviation maintenance and maintainability. Then, we will discuss the development of a new approach dedicated to maintainability stakeholders in order to implement HFE without in-depth knowledge or experience in it. This approach, called preliminary ergonomics analysis in maintainability (PEAM), has been developed in the industrial context. We will also present the integration and impact of PEAM in the maintainability department of a helicopter manufacturer, by comparing two periods, before and after PEAM integration.

2 The context of the study

2.1 General context in maintainability

In order to improve the maintenance activity performed by customers, one solution might be anticipation during the development process, i.e., proactive measures instead of reactive ones after an accident, which is the maintainability department's role by designing the future maintenance performed by operators, more particularly in airlines. The manufacturer's maintainability department can be supported by the customer's feedback to capitalise on the experience of the real work performed by maintenance operators. Additionally, this feedback, sent to maintainability stakeholders, is even more important because maintenance tasks can be performed using different working methods and parameters which depend on operator experience and training, customer work organisation or local official authority regulations (Bernard at al., 2021). The maintainability department works in three areas to improve the maintenance activity: product design, tool design, and procedure (Lee et al., 2008). For example, to perform a visual check, the sise and the position of the hatch, located on the fuselage (engine cowling), can be improved to ensure that operators, whatever their anthropometric characteristics, can efficiently check the Main Gear Box before a flight (Figure 1). The Main Gear Box is a very sensitive part, and the operator must check it to insure no damage and no foreign object debris in the area.

Figure 1 Helicopter H130 (see online version for colours)



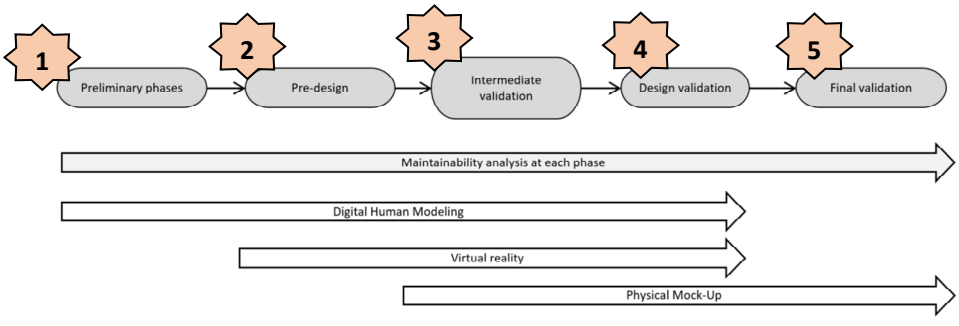
The maintainability department stakeholders (composed of mechanical engineers) are often lacking in HFE knowledge and expertise (Broberg, 2007). However, our previous studies have shown that the maintainability stakeholders are focused entirely on the physical dimension in aviation maintainability and more particularly in the helicopter field (Bernard et al, 2019a). This study highlights the heterogeneous integration of HFE into the design process, with a poor compromise between the design criteria and HFE criteria. Also, this study shows the use of simulation tools such as DHM, virtual reality (VR) and physical mock-up (PMU) as the common tools between the maintainability stakeholders and the HFE specialists. The following paragraph details their characteristics in maintainability.

2.2 The interest of simulation tools

Simulation tools are used to perform design reviews between design office stakeholders, not dedicated to the HFE criteria (Shephard et al., 2004); whereas previous studies have already shown an interest in simulation tools to study HFE in maintainability (Aromaa et al., 2014; Bernard et al., 2019b). These simulation tools are complementary depending on the phase of the design process. Figure 2 introduces a maintainability design process and the simulation tools currently used in the design office, to perform a maintainability analysis at each phase, without the contribution of HFE methodology or a specialist. For example, during the first phases of the design process, the design is not frozen due to the long iterative exchange between all the design stakeholders, finding the best design compromise. In this condition, the use of DHM and VR is more efficient than PMU regarding development cost and timely execution of each iteration phase. PMU is dedicated to the final phase, while the design is frozen, and the design office needs to validate before the production phase. During the intermediate validation, a choice of simulation tools can be proposed, depending on the technical detail level requested. This phase is very important because it selects meaningful proposal concepts prior to freezing the design with the best one. However, maintainability stakeholders must follow a specific protocol to improve the efficiency of each simulation tool. For example, physical parts must be inserted for the VR platform to simulate real contacts and forces when the operators are immersed in the VR. Additionally, simulation tools are used to assess HFE criteria but there is complementarity between these tools. DHM is performed to assess the physical dimension of HFE without a real operator (visual field, collision, posture,

anthropometry, etc.) (Satheeshkumar and Krishnakumar, 2014). Concerning VR and PMU, the three dimensions defined by IEA (2000) (physical, cognitive and organisation) can be assessed with real operators.

Figure 2 Phases in the maintainability design process and simulation tools used by non-HFE specialists (see online version for colours)



In order to improve HFE integration in the maintainability design process, a new organisational procedure has been developed between an aviation industrialist and a laboratory, specialised in HFE engineering. This approach should be adapted to all maintainability stakeholders, including non-HFE specialists, but does not replace the HFE specialist who controls and performs a more detailed analysis if required. Therefore, the aim of this paper is to develop and detail this new proposed approach, developed and tested in an industrial context with a European helicopter manufacturer. We will observe the first results of the impact of this proposed approach, comparing the HFE analysis performed by non-HFE specialists, before and after deployment of the proposed approach.

3 Method

This section is divided into two parts. The first part details the development of the PEAM approach and the second one describes follow-up PEAM approach in an experimental study. The authors developed PEAM and then followed it up with the specific indicators in the industrial experiments. The authors have ensured that the working group (described below) was monitored, without influencing them, in both the development and the follow-up phases.

3.1 Development of PEAM

We created a working group composed of two volunteer maintainability stakeholders, selected for their minimum experience of ten years in the maintainability design office. The working group also included an independent HFE specialist from the industry, who worked in another design office department but was familiar with the maintainability field and associated constraints. Two HFE researchers from the partner laboratory were also included to provide an external viewpoint. The objective was to develop an approach adapted to all maintainability stakeholders, particularly the non-HFE specialist. This

approach should be deployed as soon as the maintainability stakeholders study a maintenance situation in development, irrespective of the design phase. We held three meetings lasting two hours to exchange, share and make decisions regarding the principle of the new approach called PEAM.

PEAM is mainly based on a new organisational procedure, which includes well-known HFE tools, to be followed by the maintenance design engineers. We propose to detail the primary information concerning the PEAM approach which is divided into three parts and can be considered as a protocol to be followed by the maintainability stakeholder.

- Choosing the best simulation tool depending on the work situation to be studied and on the phase of the design process:
  a Four simulation tools are proposed with PEAM: computer-aided design (CAD); DHM, VR and PMU. These four tools are currently and commonly used in various industries to perform design reviews and are known within the maintainability department. These tools may be also used to assess the HFE of a work environment.
  b Five phases of the design process are distinguished:
    1 preliminary phases
    2 pre-design review
    3 maintainability analysis
    4 design validation
    5 final validation.

  These phases have been designed according to the industrial process and literature (Clarkson and Eckert, 2010).

- Choosing the best HFE indicators suited to the simulation tool and the work situation: according to the working group, we have selected seven indicators regularly used in the literature to study the maintenance activity, whatever the industrial context: automotive, aviation etc. (Di Gironimo et al., 2004; De Leon et al., 2012; Marzano et al., 2015). These indicators are used to study the physical, cognitive and organisational components of ergonomics (IEA, 2000). We investigated whether these HFE indicators are applicable for study through simulation tools, if they are relevant for the analysis of maintenance activity and if they can be properly assessed by non-specialists in HFE (Bernard et al., 2019b). Indeed, the indicators chosen are easily defined and understandable by maintainability stakeholders according to the working group, because the indicators are already known and used by maintainability stakeholders but without quantification (Broberg, 2007; Bernard et al., 2019a). The seven HFE indicators proposed in PEAM are detailed in Table 1.

- Choosing the measurement tools suited to the simulation tool and the work situation: We have divided the measurement tools, depending on the presence of the real operator.

a With a real operator on the VR platform and PMU, we propose to use: demographic information survey, Borg scale (Borg, 1982), NASA-TLX of mental workload assessment (Hart and Staveland, 1988), timer and camera to study the work organisation, real activity, and the operator/material flows.

b Without and with a real operator, common measurement tools can be used. In order to adapt the criteria to the non-HFE specialists, with a working group we have developed an automatic Excel file to assess HFE indicators (Safety at work, forces, postures, collisions ams visual field). Each indicator is assessed according to the risk matrix (Cox, 2008) dissociating the probability, the impact for the operator and the impact for the helicopter (Table 2). The HFE specialist can support the link between the uses of various HFE tools, like NASA-TLX. Even if PEAM could allow some autonomy for non-HFE engineers, a supportive HFE specialist must ensure HFE awareness.

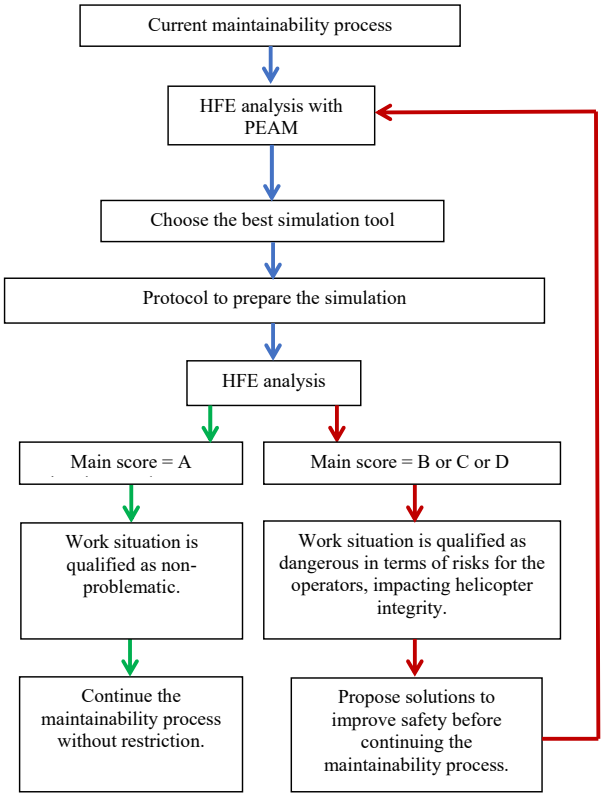
Table 1 HFE indicators used in the PEAM approach

HFE indicators	*References*
Safety at work (defined by the risks of injuries – falling, cutting, crushing, etc.)	
Force	Boothroyd and Alting (1992)
Posture	Wani and Gandhi (1999)
Collision	De Sa and Zachmann (1999)
Visual field	Di Gironimo et al. (2004)
Mental workload	De Leon et al. (2012)
Time execution	Regazzoni and Rizzi (2014)
Organisation (operator and material flows)	Marzano et al. (2015)

Table 2 Risk matrix to assess HFE indicators dissociating the probability, the impact for the operator and helicopter (see online version for colours)

	1	*2*	*3*	*4*	*5*
Probability (per day) while the operator performed the maintenance	Very unlikely (may occur only in exceptional circumstances)	Unlikely (could occur at some time)	Possible (might occur at some time)	Likely (will probably occur in most circumstances)	Almost certain (is expected to occur in most circumstances)
Impact on the environment (helicopter)	Insignificant (minor damage, helicopter can fly)	Minor (damage requiring maintenance, helicopter can fly)	Moderate (damage needing repair, helicopters can only fly to reach the maintenance hangar)	Major (damage can lead a serious dysfunction, helicopter cannot fly or land immediately)	Catastrophic (irreversible damage, in flight accident)
Impact for the operator	Insignificant (minor injury or first aid treatment)	Minor (injury requiring treatment by medical staff)	Moderate (major injury, hospitalisation)	Major (multiple major injuries)	Catastrophic (death)

Figure 3 Conceptual PEAM model (see online version for colours)



At the end of the PEAM process, a general score is automatically edited: A (Maintenance performed without risk); B (Maintenance performed with minor risks; C (Maintenance performed with high constraints) and D (Maintenance cannot be performed, the risk is too high). This scale is built according to the working group and the current confidential maintainability process. PEAM is inserted in the current maintainability process to ensure full acceptability (Nadal et al., 2019), to avoid rejection by the maintainability stakeholders. The conceptual model detailed in Figure 3 provides an overview of the PEAM process.

PEAM is designed to be deployed systematically, as soon as the maintainability stakeholders study a maintenance situation in development, irrespective of the design phase. The risk matrix is completed by the engineers themselves with the support of the HFE specialist. Thanks to the simulation tools, some work situations are very simple and a simple check by HFE specialist at the end of the HFE analysis is sufficient. Some complex analyses require the continuous support of the HFE specialist. If the situation is considered too complex, the HFE specialist will perform a full HFE analysis. The work situation rating enables the maintainability stakeholder to self-assess a situation that they have designed themselves or compare two different design proposals to provide a trade-off. As the iterations are quite short between the different design offices, the maintainability stakeholder can thus independently argue with other design stakeholders

regarding any issues raised through the integration of HFE in their maintainability analysis. An HFE specialist can then, if necessary, resume the analysis carried out by the maintainability stakeholders and further investigate the maintenance task simulated initially.

Our research introduces the first results of PEAM deployment, more particularly the difference before and after PEAM application.

3.2 Industrial experiment

3.2.1 Research setting

According to the working group and the context of the aviation industry, we have decided to compare the HFE consideration without and with PEAM. In the literature, the comparative method is defined as an objective method to validate the use and the performance of an approach (Plantard et al., 2017; Gallagher et al., 2017). This experimentation has been performed with the eight maintainability stakeholders, over 16 months divided into two distinct periods:

- from April 2020 to December 2020, we observed and monitored the maintainability stakeholders conducting thirty-four maintainability analyses WITHOUT applying PEAM
- from January 2021 to September 2021, we observed and monitored the same maintainability stakeholders conducting forty-four maintainability analyses WITH PEAM integration.

The industrial context has not made it possible to study the same maintenance tasks without and with PEAM. This is why; we focused our observation on similar work areas and helicopters to observe similar scenarios. Additionally, the maintenance tasks selected were very similar in terms of time, force, tools and complexity. The tasks were concentrated on the upper deck, the part of the helicopter where the engines are located. In this area, a lot of recurrent maintenance tasks are performed because there are many sensitive and critical mechanical, electrical and hydraulic parts. For example, we studied, both with and without PEAM, the accessibility to remove an alternator in the engine, very close to other sensitive parts composing the work area. Working in this area is complex, firstly, for the operator who must adapt the best way of working (managing maintenance tools, posture, etc.) and secondly, for the environment, so as not to damage the surrounding parts and cause a flight safety risk.

3.2.2 Participants

In order to monitor the maintainability analyses integrated in the HFE study, eight maintainability stakeholders have been selected, with the same mechanical engineering background. They have been selected because they were continuously involved in the maintainability department over the 16 months of the experimentation, between April 2020 and September 2021. They are all specialised in maintainability and their main activity is to design work situations to anticipate the future maintenance activity on helicopters. They can propose technical solutions to improve the helicopter's architecture; develop maintenance tools and also offer procedures or work sequences to support the maintenance operator. The mean age is 31.4 years (± 6.8 years) and the mean

of the number of years' experience in the maintainability department is 7.9 years (± 5.6 years). They are all specialised in mechanical engineering and maintainability. None of them received training in HFE. All the participants are given training to learn how to use PEAM. This training was held in three meetings lasting 2 hours, the first meeting detailed the theoretical approach and the other two meetings applied PEAM through real case study. At the end of the training, maintainability stakeholders received PEAM guidelines summarising useful information for the use of PEAM. All participants have used PEAM for each maintainability process, as detailed in Figure 3.

3.2.3 The investigation instruments

The study was divided into two separate surveys:

- Survey 1: this semi-directive survey is composed of eight questions. Questions were created in accordance with specific literature on survey designing (Bradburn et al., 2004). This survey focuses on general demographic information; it identifies the participants by age, role in the maintainability department, HFE background and training, etc.
- Survey 2: the survey was developed by the working group, and it follows the survey rules detailed by Bradburn et al. (2004). The objective of survey 2 is to follow the HFE analysis conducted with or without the use of PEAM within the maintainability analysis. This survey collects all the information relating to the HFE approaches conducted during each phase of the design process. Three questions were asked regarding the use of PEAM:
  1 Which simulation tools are used?
  2 In which phases of the design process is the HFE analysis performed?
  3 Which HFE indicators did you use?

  By completing these questionnaires before and after deploying PEAM through an Excel file shared with the research leader, we can compare the results obtained during the two periods observed.

We used the ANOVA test to compare the number of HFE analyses performed, with PEAM deployment. Fisher's exact test was also used to statistically analyse the difference between:

- the use of each simulation tool, at each phase of the design process, without and with PEAM
- the use of each HFE indicator, at each phase of the design process, without and with PEAM.

4 Results

The differences between the phases of the design process and the simulation tools used were analysed, without and with the deployment of PEAM, using Fisher's test. Table 3 presents the results for each phase of study of the process; we can read the percentage of use of each simulation tool. For example, in phase 2 (pre-design review) without PEAM,

DHM was used 16 times out of 21 (76.2%) in order to conduct maintainability analyses integrating a HFE approach. Phase 3, 'intermediate validation', is not compared over the 16-month period, indeed no participants performed a HFE approach in this phase compared to the other phases observed.

For phases 1, 2, 4 and 5, we observe significant differences without and with PEAM. We also observe that for phases 2, 4 and 5 only without PEAM, some HFE analyses are carried out without any simulation tool. Also, regarding the cumulative percentage, meaning the percentage of all simulation tools combined for each phase, we observe a difference with and without PEAM. Indeed, we observe values exceeding 100% only in the phases without PEAM (phases 1, 2, 4 and 5) meaning the use of several simulation tools for the same analysis. For example, without PEAM, three tools were used (CAD, DHM and PMU) in phase 2. The cumulative percentages reached 184.7%, which implies that for certain HFE approaches, several simulation tools have been used. However, with the deployment of PEAM, we observe two effects in phase 2:

- The simulation tools recommended for phase 2 in the PEAM approach were used (DHM and VR). We can detail another example in phase 5 where the PMU recommended in the PEAM approach reaches a usage score of 94.7% against 75% without PEAM.
- The cumulative score reaches 100%, indicating that only one simulation tool has been used for each maintainability analysis integrating a HFE approach. This observation is repeated for phases 1, 4 and 5.

Table 3 Difference in the use between each simulation tool (CAD, DHM, VR and PMU), without and with PEAM, at each phase of the process

		No tool (%)	*CAD (%)*	*DHM (%)*	*VR (%)*	*PMU (%)*	*Difference*
Phase 1	Without PEAM	0	100	100	0	0	**
	With PEAM	0	0	100	0	0	
Phase 2	Without PEAM	14.3	61.9	76.2	0	47.6	***
	With PEAM	0	0	54.6	45.4	0	
Phase 3	Without PEAM	0	0	0	0	0	NS
	With PEAM	0	0	0	0	0	
Phase 4	Without PEAM	57.1	14.3	14.3	0	28.6	***
	With PEAM	0	0	50	0	50	
Phase 5	Without PEAM	25	25	0	0	75	***
	With PEAM	0	0	5.3	0	94.7	

Notes: The Fisher test was used to measure the difference with and without PEAM ($N = 8$; $^{**}p \leq 0.01$; $^{***}p \leq 0.001$).

To better understand the differences, the synergy between the phases of the process and the HFE indicators was analysed by the Fisher test (Table 4). For each phase, the percentage use of the HFE indicator is detailed. For example, in phase 2, without PEAM, force was assessed 11 times out of 21 HFE approaches performed (52.4%).

For phases 1, 2, 4 and 5, we observe significant differences without and with PEAM. With PEAM, we observe scores reaching 100% for each of phases 1, 2, 4 and 5, meaning that some HFE indicators were assessed for each maintainability analysis integrating a

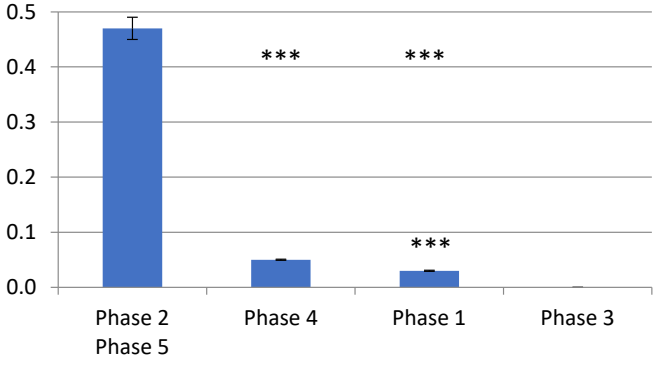
HFE approach. For example, with PEAM, the posture is an indicator studied in all analyses and all phases of the process.

Table 4 Difference in use between each HFE indicator, without and with PEAM, at each phase of the process

		Posture (%)	*Force (%)*	*Visual field (%)*	*Collision (%)*	*Safety at work (%)*	*Mental workload (%)*	*Time execution (%)*	*Difference*
Phase 1	Without PEAM	100.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**
	With PEAM	100.0	100.0	100.0	100.0	0.0	0.0	0.0	
Phase 2	Without PEAM	95.2	52.4	66.7	4.8	0.0	0.0	28.6	***
	With PEAM	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	45.5	45.5	
Phase 3	Without PEAM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	NS
	With PEAM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Phase 4	Without PEAM	57.1	85.7	28.6	14.3	0.0	0.0	0.0	***
	With PEAM	100.0	100.0	50.0	0.0	50.0	0.0	0.0	
Phase 5	Without PEAM	100.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	***
	With PEAM	100.0	78.9	73.7	0.0	78.9	73.7	73.7	

Notes: The Fisher test was used to measure the difference with and without PEAM (N = 8; **p ≤ 0.01; ***p ≤ 0.001).

Figure 4 With PEAM, distribution of the phases depending on average (± S.D.), the number of HFE analyses performed, all maintainability stakeholders combined (see online version for colours)



Note: ***p ≤ 0.001

If we now analyse the type of indicator assessed, we can observe differences without and with PEAM. For example, in phase 1, without PEAM, posture and visual field are the only HFE indicators considered whereas with PEAM, force and collisions are added. The mental workload does not appear in any phases without PEAM, whereas with PEAM this

HFE indicator appears in phases 2 and 5, even reaching 73%. However, we observe that phases 2 and 5 are highlighted. Indeed, phase 2 is the only phase, with PEAM, where all HFE indicators are used. The percentage use of all HFE indicators is also the largest of the five phases with five indicators at 100%. Phase 5 is the phase where the usage gap is the most important, only two HFE indicators without PEAM (posture and effort) and six HFE indicators with PEAM (posture, force, visual field, work safety, mental load and execution time).

With PEAM, all operators combined, it appears on the basis of the statistical analyses carried out (ANOVA) that the number of HFE analyses differs significantly according to the phases. Phases 2 and 5 have no differences and are the phases where the HFE analyses are the most significant. The difference is considered as significant when comparing phases 4 and 1 ($p \leq 0.001$). Figure 4 illustrates this result.

5 Discussion

A new HFE approach is proposed to improve HFE integration in the aviation maintainability design office. This approach, called PEAM, has been developed following an industrial analysis showing the lack of HFE skills and knowledge by maintainability stakeholders (Broberg, 2007; Bernard et al, 2019a). The PEAM approach, built with a working group composed of maintainability stakeholders and a HFE specialist, is designed in three parts:

1 choosing the best simulation tool

2 choosing the best HFE indicators

3 choosing the measurement tools.

5.1 The PEAM approach

The originality of the PEAM approach is its suitability to each phase of the maintainability design process. Indeed, simulation tools, in accordance with the work of Chitescu et al. (2003) and Bernard et al. (2019b), may be more or less efficient, depending on the phase of the design process. Therefore, it has been decided to distribute the simulation tools according to the phases of the design process. However, the majority of work in the maintainability literature does not distinguish between the phases of the process for deployment, whatever the simulation tools, such as DHM (Di Gironimo et al., 2004; Regazzoni et al., 2014) or VR (Garza et al., 2013; Seth et al., 2011). The authors cited the development of approaches to integrate HFE without taking into account the phase of the design process which, however, impacts HFE analysis. Indeed, studies by Perez et al. (2014) and Krüger and Nguyen (2015) show, for example, the use of DHM early in the design process where there are many iterations and technical data vary. DHM is very easy and quick to set up and is very well suited to these early stages. Later in the process, when the phases of the design process are already defined and frozen, VR seems more suited (Chitescu et al., 2003). The level of technical detail in the digital model is then higher and VR is very well suited to the needs for collaboration in these phases. Indeed, several authors (Gherbi et al., 2006; Lorisson, 2010) have shown the effectiveness of VR in bringing together and federating multi-business working groups.

The last phases of the design process correspond to the detailed study before the final product definition is validated. The physical model is then deployed. Bayramzadeh et al. (2018) therefore speak of realistic simulation in which the ecological validity of the simulation is very strong.

Also, the implementation of a protocol dedicated to each simulation tool was decided by the working group composed of experts in maintainability and in HFE. These protocols are based on current cases of study in the literature, particularly around simulation. Our approach thus makes it possible to remain within the recommendations of Béguin and Weill-Fassina (1997) and Rabardel et al. (2014) which detail the implementation of structured and homogeneous protocols to ensure efficient simulations in order to carry out HFE analysis. However, these protocols, sometimes complex and dedicated to HFE specialists, have been simplified according to the working group. This adaptation must be deployable by non-HFE specialists, enabling the simulation of maintenance tasks to assess the observed work situation. Today, the scientific literature offers more analysis tools to quantify a work situation by non-specialists in HFE than global approaches allowing implementation of general protocols to prepare simulations to better integrate HFE in maintainability. Indeed, in the literature, HFE tools like RULA (McAtamney and Corlett, 1993), REBA (Hignett and McAtamney, 2000), OCRA (Occhipinti, 1998), NIOSH (Waters et al., 1993), NASA-TLX (Hart and Staveland, 1988), etc., are used to analyse one of the HFE components. However, the PEAM approach is intended to be complete and adaptive to each simulation tool in order to study, if possible, all HFE components (physical, cognitive and organisational) while addressing non-HFE specialists.

Finally, the rating of the work situation allows the maintainability stakeholder to self-assess a situation that they have designed themselves. As the iterations are quite short between the different design offices, maintainability stakeholders can thus themselves discuss any issues raised by the integration of human factors in their maintainability analysis. A HFE expert can then, if necessary, resume the analysis carried out by the maintainability stakeholder and further investigate the maintenance task simulated initially.

The PEAM approach thus seems suited to a new form of analysis carried out independently by non-HFE specialists, but which should now be tested through practical cases in maintainability. We propose to discuss the results of the first use of PEAM in an industrial context.

5.2 Use of PEAM

Firstly, phase 3 of the maintainability design process has not been studied because any maintainability study was performed over the 16 months by the participants. Additionally, phases 2 and 5 seem to focus the attention of maintainability stakeholders with the most significant HFE studies performed throughout the design process. The interest of maintainability stakeholders can be explained by their issues. Indeed, phase 2 is a key phase in the entire design process, in particular by integrating the pre-development phase. This phase is crucial in the design process (Blanchard, 2014) because the technical specifications of a product/system are determined and validated at this phase according to the initial needs of the product life cycle. Phase 5 includes the prototype development and final validation stages. These phases are also very significant,

representing the last milestone before a definitive freeze of the architecture of the product and its production (Blanchard, 2014).

During the study of each simulation tool and each HFE indicator phase by phase, with and without PEAM, a significant difference appears for each phase. Without PEAM, we observe, for some phases, that some maintainability analyses including a HFE study, were not supported by a simulation tool. Additionally, we observe that more than one simulation tool is used for a HFE study (example in phase 2). However, with PEAM, we have observed a rationalisation of the use of simulation tools throughout the design process. Thus, we observe two effects:

- the best simulation tool was used in each phase in accordance with PEAM
- only one simulation tool has been used for each HFE analysis, as recommended by PEAM.

This is an important result, mainly in the industry. Even if triangulation of tools could provide more valid results, some studies have already shown the complementarity between simulation tools, and the efficiency of each one if correctly used (Bernard et al., 2019b). With PEAM, the best simulation tool for the work situation is used, and this tool is used more effectively with efficient outcomes. We can improve efficiency and reduce costs with better results. This is important proof for an industry to better adopt this kind of simulation tool and continuously improve their use.

Also, for the HFE indicators, with PEAM, we observe two phenomena:

- the number of HFE indicators used is higher
- the percentage use of HFE indicators is also higher.

More specifically, with VR and PMU, the maintainability stakeholder, without HFE knowledge, studies the entire dimension of HFE, physical, organisational and cognitive as defined by IEA (2000). Thus, without PEAM, the lack of HFE knowledge, but also the lack of knowledge and know-how regarding simulation tools can explain the low deployment of simulation tools and HFE indicators within the maintainability process. Indeed, the maintainability stakeholder does not know how a digital and/or physical simulation tool could help them to integrate HFE, explaining why the decision is sometimes taken to do not use the simulation tool (Bernard et al., 2019a). Additionally, the literature highlights methodologies to better use simulation tools as a support for better collaboration and cooperation in design office, but less to perform HFE studies (Vinck, 2009; Mahdjoub et al., 2010, 2013). Thus, most of the methods developed to promote the consideration of HFE in design focus either on tools addressed to stakeholders already aware of HFE (Plantard et al., 2017; Gallagher et al., 2017) or on training courses and user guides (David et al., 2008). Also, we find some studies proposing approaches used to carrying out HFE analyses whose assessment tools are the simulation tools themselves. For example, the study conducted by Geng et al. (2013), which proposes an approach for using DHM in order to perform HFE analyses. Thus, the approach assumes that the designer has already acquired significant knowledge in order, on the one hand, to use the appropriate HFE options offered in the software and, on the other hand, to use HFE knowledge to properly interpret the results. We can also cite the study of De Sa and Zachmann (1999), which highlights the potential of VR to carry out HFE analyses in design, but on the condition that the design stakeholders are trained in both HFE and VR technology fields.

We can therefore set a limit on the deployment of PEAM in the maintainability department. Even if the eight participants in the experiment were trained before using PEAM, it seems that PEAM was mainly deployed only in specific phases and not in all of the phases composing the maintainability design process. We can therefore reasonably assume that more extensive and in-depth training in simulation tools, for performing HFE analyses, could have helped them to better understand the usefulness of this analysis in all phases of the design process. We also observed the impact of PEAM with other design stakeholders, but it will be interesting to study the impact on the PEAM final score A, B, C and D.

Thus, in the light of our experiment comparing maintainability analyses, integrating a HFE approach, carried out without and with PEAM, we can highlight that:

- Methodological support allows a better choice of simulation tools at each phase of the design process, and in addition, each HFE study remains associated with a single simulation tool.
- The number of HFE indicators used with PEAM, is greater at each phase.
- The percentage use of each HFE indicator is higher when PEAM is deployed.
- The distribution of maintainability analyses including a HFE study, highlights two phases of the design process: phases 2 (pre-development) and 5 (validation) recognised as key phases.

Our study showed that the PEAM approach can aid maintenance design engineers (non-experts in HFE) to better integrate HFE into the design process. With regard to the literature, they have already proposed some approaches for integrating HFE (Kirwan, 2000; Waterson and Kolose, 2010; Rae et al., 2020) such as the adapted version of EWA (Da Conceição et al., 2020) or the participatory simulation (PS) (Andersen and Broberg, 2021). However, any approach adopted must be compatible with the characteristics of the industry studied, in the case of helicopter maintainability for example, specific characteristics such as: the context, the maintainability design process, the simulation tools, which depend on the type of technology used (this technology, like VR, has very different features depending on the hardware and software), and the HFE criteria. Respecting all these criteria helps to adapt the approach perfectly to the current design process in order to ensure its acceptability by all the stakeholders involved in the design process.

PEAM was developed and deployed for a helicopter manufacturer. However, this approach could also be adapted to other design departments or industries with similar maintenance issues (automotive, train, energy and other industries). Therefore, we suggest PEAM as a general recommendation for other industries, especially for design offices. It may need to be adapted according to their characteristics. The successful transferability of the PEAM approach requires three main aspects to be taken into consideration: first, the simulation tools were studied in a helicopter maintenance context. However, the performance criteria of simulation tools for HFE analysis must be adapted to the constraints of the dedicated work area. Secondly, the HFE indicators are also suitable for maintenance in a helicopter context, where certain specific constraints (accessibility for example) apply. Finally, PEAM was adapted within an existing industrial process, it did not add a new process, running the risk of losing the support of the maintainability stakeholders. It is therefore appropriate to adapt PEAM to the existing

process of another industry, while requiring a study to ensure acceptability (Nadal et al., 2019). Additionally, in any case, a HFE specialist must supervise this transfer and the use of PEAM, to keep HFE integration under control and to provide continuous training for non-HFE specialists.

6 Conclusions

With the deployment of PEAM, the simulation tools used to perform HFE analysis were better suited to the situation. The simulation was carried out in a consistent and relevant way of working in each phase of the design process in relation to the PEAM approach recommendations. We observe in particular that the maintainability stakeholders only use one simulation tool (the most suitable one), and not several, for each HFE analysis, as we have observed without PEAM deployment. Additionally, the HFE indicators are more used: on the one hand, according to quantity (gestures, postures, force, etc.) and on other hand, according to their percentage of use over the whole process. Thus, the basic characteristics, expectations and needs of maintenance operators, are better integrated in the maintainability process.

Additionally, in the design process, two phases are considered as being critical: pre-development (2) and validation (5) (Blanchard, 2014). With PEAM, we observe in both of these phases, a larger number of HFE analyses, combining the appropriate simulation tools and adequate HFE indicators, according to the PEAM approach recommendations. However, PEAM clearly considers the HFE analysis at each phase of the design process; according to the efficiency of simulation tools in performing the HFE analysis as already observed in some studies (De Sa and Zachmann, 1999; Chitescu et al., 2003; Geng et al., 2013; Bayramzadeh et al., 2018). Even if each maintainability stakeholder was trained before using PEAM, we can therefore assume that more extensive and in-depth training could have helped them to better understand the usefulness of the HFE analysis in all phases of the design process.

We can mention a limit to our study. Indeed, between the two periods observed, the work situations were not all similar, which could constitute a bias for certain results. We can then assume that this same study over a longer period would have provided better visibility of the deployment of PEAM.

References

AFIM (2004) 'French Association of Engineers and Managers of maintenance-health and safety at work: front-line maintenance professions', *National Maintenance Guide*.

Amundarain, A., Borro, D., Matey, L., Alonso, A.G. and de Guipúzcoa, T. (2003) 'Occlusion culling for the visualization of aeronautical engines digital mock-ups', *Proceedings of Virtual Concept*, Biarritz, France, pp.5–7.

Andersen, S.N. and Broberg, O. (2021) 'Transfer of ergonomics knowledge from participatory simulation events into hospital design projects', *Work*, Vol. 68, No. 2, pp.365–378.

Andrews, T., Searcy, B. and Wallace, B. (2019) 'Using virtual reality and motion capture as tools for human factors engineering at NASA Marshall Space Flight Center', *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Springer, Cham, July, pp.399–408.

Aromaa, S., Viitaniemi, J., Helin, K. and Vento, A. (2014) 'Ergonomic evaluation of cab design employing digital and physical mock-ups', *Advances in Ergonomics in Design, Usability & Special Populations: Part I*, Vol. 16, p.410.

Bayramzadeh, S., Joseph, A., Allison, D., Shultz, J., Abernathy, J. and Group, R.O.S. (2018) 'Using an integrative mock-up simulation approach for evidence-based evaluation of operating room design prototypes', *Applied Ergonomics*, Vol. 70, pp.288–299.

Béguin, P. and Weill-Fassina, A. (1997) 'De la simulation des situations de travail à la situation de simulation', *La simulation en ergonomie: connaître, agir et interagir*, pp.5–28.

Bernard, F., Zare M., Sagot, J-C. and Paquin, R. (2019a) 'Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability', *Hum. Factors Man.*, Vol. 29, pp.350–360, https://doi.org/10.1002/hfm.20792.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J-C. and Paquin, R. (2019b) 'Using digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability', *Human Factors*, http://doi.org/10.1177/0018720819861496.

Bernard, F., Zare, M., Murie, C. and Sagot, J-C. (2021) 'Dimensions physiques et cognitives: vers une nécessaire prise en compte en maintenabilité aéronautique', *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, Vol. 82, No. 2, pp.170–183.

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*, Vol. 11.

Boothroyd, G. and Alting, L. (1992) 'Design for assembly and disassembly', *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 2, pp.625–636.

Borg, G. (1982) 'Psychophysical bases of perceived exertion', *Medicine and Science in Sport and Exercise*, Vol. 14, pp.377–381.

Bradburn, N. et al., (2004) *Asking Questions: The Definitive Guide to Questionnaire Design: For Market Research, Political Polls, and Social and Health Questionnaires*, John Wiley & Sons.

Broberg, O. (2007) 'Integrating ergonomics into engineering: Empirical evidence and implications for the ergonomists', *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, Vol. 17, No. 4, pp.353–366.

Broberg, O., Andersen, V. and Seim, R. (2011) 'Participatory ergonomics in design processes: the role of boundary objects', *Applied Ergonomics*, Vol. 42, No. 3, pp.464–472.

Chitescu, C., Sagot, J.C. and Gomes, S. (2003) 'Favoriser l'articulation 'Ergonomie/conception de produits' à l'aide de mannequins numériques', *Dans les actes de la conférence 10eme Séminaire CONFERE (Collège d'Etudes et de Recherches en Design et Conception de Produits) sur l'Innovation et la Conception*, Belfort, France, July, pp.3–4.

Clarkson, J. and Eckert, C. (Eds.) (2010) *Design Process Improvement: A Review of Current Practice*, Springer Science & Business Media.

Čokorilo, O. (2011) 'Aircraft performance: the effects of the multi attribute decision making of non time dependent maintainability parameters', *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp.42–48.

Cox, Jr., L.A. (2008) 'What's wrong with risk matrices?', *Risk Analysis*, Vol. 28, No. 2, doi:10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x.

da Conceição, C.S., Broberg, O. and Duarte, F. (2020) 'A six-step model to transform an ergonomic work analysis into design guidelines for engineering projects', *Work*, Vol. 66, No. 3, pp.699–710.

David, G., Woods, V., Li, G. and Buckle, P. (2008) 'The development of the quick exposure check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders', *Applied Ergonomics*, Vol. 39, No. 1, pp.57–69.

De Leon, P.M. et al. (2012) 'A practical method for the maintainability assessment in industrial devices using indicators and specific attributes', *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 100, pp.84–92.

De Sa, A.G. and Zachmann, G. (1999) 'Virtual reality as a tool for verification of assembly and maintenance processes', *Computers & Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp.389–403.

Di Gironimo, G., Monacelli, G. and Patalano, S. (2004) 'A design methodology for maintainability of automotive components in virtual environment', *D.S. 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference*, Dubrovnik, Croatia.

Gallagher, S., Sesek, R.F., Schall Jr., M.C. and 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*, Vol. 63, pp.142–150.

Garza, L.E., Pantoja, G., Ramirez, P., Ramirez, H., Rodriguez, N., Gonzalez, E., Quintal, R. and Perez, J.A. (2013) 'Augmented reality application for the maintenance of a flapper valve of a Fuller-Kynion type M pump', *Procedia Computer Science*, Vol. 25, pp.154–160.

Geng, J., Zhou, D., Lv, C. and Wang, Z. (2013) 'A modeling approach for maintenance safety evaluation in a virtual maintenance environment', *Computer-Aided Design*, Vol. 45, No. 5, pp.937–949.

Gherbi, R., Bourdot, B., Vezien, J.M., Herisson, J., Fauvet, N. and Ferey, N. (2006) 'Le traité de la réalité virtuelle, vol 4: Les applications de la Réalité Virtuelle', in Fuchs, P., Moreau, G. and Papin, J-P. (Eds.): *Explorations de données scientifiques et expérimentations virtuelles*, Chapter 4, Presses de l'Ecoles de Mines de Paris.

Gruber, M., De Leon, N., George, G. and Thompson, P. (2015) 'Managing by design', *Academy of Management Journal*, Vol. 58, No. 1, pp.1–7.

Hart, S.G. and Staveland, L.E. (1988) 'Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research', *Advances in Psychology*, Vol. 52, pp.139–183.

Hignett, S. and McAtamney, L. (2000) 'Rapid entire body assessment (REBA)', *Applied Ergonomics*, Vol. 31, No. 2, pp.201–205.

Hobbs, A.N. (2000) 'Maintenance 'error', lessons from the BASI survey', *Flight Safety Australia*, Vol. 4, pp.36–37.

Horeman, T., Akhtar, K. and Tuijthof, G. J. (2015) 'Physical simulators', in *Effective Training of Arthroscopic Skills*, pp.57–69, Springer Berlin Heidelberg.

International Ergonomics Association (IEA) (2000) *'What is Ergonomics', 'IEA members' and 'Study Programs'* [online] http://www.iea.cc/index.php (accessed 1 September 2022).

Kirwan, B. (2000) 'Soft systems, hard lessons', *Applied Ergonomics*, Vol. 31, No. 6, pp.663–678.

Krüger, J. and Nguyen, T.D. (2015) 'Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations', *CIRP Annals*, Vol. 64, No. 1, pp.9–12.

Lee, S.G., Ma, Y.S., Thimm, G.L. and Verstraeten, J. (2008) 'Product lifecycle management in aviation maintenance, repair and overhaul', *Computers in Industry*, Vol. 59, No. 2, pp.296–303.

Lo, C.K., Chen, C.H. and Zhong, R.Y. (2021) 'A review of digital twin in product design and development', *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 48, p.101297.

Lorisson, J. (2010) 'Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus', *Techniques de l'ingénieur TE*, Vol. 5, p.965.

Mahdjoub, M., Al Khatib, A., Bluntzer, J.B. and Sagot, J. C. (2013) 'Multidisciplinary convergence about "product-use" couple: intermediary object's structure', in *D.S. 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.

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*, Vol. 42, pp.402–413.

Marzano, A., Friel, I., Erkoyuncu, J.A. and Court, S. (2015) 'Design of a virtual reality framework for maintainability and assemblability test of complex systems', *Procedia CIRP*, Vol. 37, pp.242–247.

McAtamney, L. and Corlett, E.N. (1993) 'RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders', *Applied Ergonomics*, Vol. 24, No. 2, pp.91–99.

Mourtzis, D. (2020) 'Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends', *International Journal of Production Research*, Vol. 58, No. 7, pp.1927–1949.

Nadal, C., Doherty, G. and Sas, C. (2019) 'Technology acceptability, acceptance and adoption-definitions and measurement', *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, May.

Nishanth, R., Muthukumar, M.V. and Arivanantham, A. (2015) 'Ergonomic workplace evaluation for assessing occupational risks in multistage pump assembly', *International Journal of Computer Applications*, Vol. 113, No. 9, pp.562–566.

Occhipinti, E. (1998) 'OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs', *Ergonomics*, Vol. 41, No. 9, pp.1290–1311.

Perez, J., de Looze, M.P., Bosch, T. and Neumann, W.P. (2014) 'Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design', *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 44, No. 2, pp.298–306.

Plantard, P., Shum, H.P., Le Pierres, A.S. and Multon, F. (2017) 'Validation of an ergonomic assessment method using Kinect data in real workplace conditions', *Applied Ergonomics*, Vol. 65, pp.562–569.

Rabardel, P., Carlin, N. and Chesnais, M. (2014) *Ergonomie: concepts et méthodes*, Octarés Edt.

Rae, A., Provan, D., Aboelssaad, H. and Alexander, R. (2020) 'A manifesto for reality-based safety science', *Safety Science*, Vol. 126, p.104654.

Regazzoni, D. and Rizzi, C. (2014) 'Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability', *Computer-Aided Design and Applications*, Vol. 11, No. 1, pp.10–19.

Saleh, J.H., Ray, A.T., Zhang, K.S. and Churchwell, J.S. (2019) 'Maintenance and inspection as risk factors in helicopter accidents: analysis and recommendations', *PloS One*, Vol. 14, No. 2.

Satheeshkumar, M. and Krishnakumar, K. (2014) 'Digital human modeling approach in ergonomic design and evaluation – a review', *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 5, No. 7, pp.2229–5518.

Seth, A., Vance, J.M. and Oliver, J.H. (2011) 'Virtual reality for assembly methods prototyping: a review', *Virtual Reality*, Vol. 15, No. 1, pp.5–20.

Shephard, M.S., Beall, M.W., O'bara, R.M. and Webster, B.E. (2004) 'Toward simulation-based design', *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 40, No. 12, pp.1575–1598.

Shi, Y. and Liu, Y. (2012) "Application of DELMIA on maintainability design of aircraft', *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*, Atlantis Press.

Teperi, A.M., Paajanen, T., Asikainen, I. and Lantto, E. (2023) 'From must to mindset: outcomes of human factor practices in aviation and railway companies', *Safety Science*, Vol. 158, p.105968.

Vinck, D. (2009) 'De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière', *Revue d'anthropologie des connaissances*, Vol. 3, No. 1, pp.51–72.

Wani, M.F. and Gandhi, O.P. (1999) 'Development of maintainability index for mechanical systems', *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 65, No. 3, pp.259–270.

Waters, T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A. and Fine, L.J. (1993) 'Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks', *Ergonomics*, Vol. 36, No. 7, pp.749–776.

Waterson, P. and Kolose, S. L. (2010) 'Exploring the social and organisational aspects of human factors integration: a framework and case study', *Safety Science*, Vol. 48, No. 4, pp.482–490.

Préparation des analyses ergonomiques en bureau d'études aéronautique : résilience et adaptation en temps de crise

Fabien Bernard, Émilie Loup-Escande

Dans Le travail humain 2023/1 (Vol. 86), pages 69 à 93
Éditions Presses Universitaires de France

ISSN 0041-1868
ISBN 9782130843702

Article disponible en ligne à l'adresse
https://www.cairn.info/revue-le-travail-humain-2023-1-page-69.htm

CAIRN.INFO
MATIÈRES À RÉFLEXION

Découvrir le sommaire de ce numéro, suivre la revue par email, s'abonner...
Flashez ce QR Code pour accéder à la page de ce numéro sur Cairn.info.

Distribution électronique Cairn.info pour Presses Universitaires de France.
La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

RÉALISATION ET PRATIQUE
REALIZATIONS AND PRACTICE

PRÉPARATION DES ANALYSES ERGONOMIQUES EN BUREAU D'ÉTUDES AÉRONAUTIQUE : RÉSILIENCE ET ADAPTATION EN TEMPS DE CRISE

PREPARATION OF ERGONOMIC ANALYSIS IN AN AERONAUTICAL DESIGN OFFICE: RESILIENCE AND ADAPTATION IN TIMES OF CRISIS

PAR/BY FABIEN BERNARD [1, 2] & EMILIE LOUP-ESCANDE [3]

SUMMARY

The preparation of ergonomic analyzes is a sensitive stage in the design office, where design ergonomics is practiced and where future activity is anticipated through simulation tools. In this context, the challenge is to define the best level of representativeness of the simulated situation and therefore ensure a high ecological value of the analysis. The preparation stage is all the more complex to master when it must bring together, in the design office, stakeholders who are not aware of ergonomic analyses, their interest and their impact on the products designed. However, companies may have to adapt processes for preparing ergonomic analyses. For example, the health crisis linked to COVID-19 has led to an unexpected and brutal change of work organizations in many companies, all sectors combined: slowdown or stoppage of production, mass teleworking, disruption of physical exchanges affecting both the flow of people as the flow of materials, etc. This major crisis, like many others, has disturbed ecosystems previously considered as reliable and stable. It has also made it possible, through an effect of resilience, to set up new ways of working by adapting. Thus, in this paper, we will make an objective and pragmatic observation within an aviation industrial organization, affecting the maintainability design office. We will thus compare the organization deployed and the associated protocols to prepare ergonomic analyzes on the maintenance activity, before and during the health crisis, mainly during the first lockdown between March and April 2020. We will try

1. Airbus Helicopter, Aéroport International Marseille Provence, 13725 Marignane Cedex ; fabien.bernard@airbus.com (auteur correspondant)
2. Université de Bourgogne Franche-Comté, 32 Av. de l'Observatoire, 25000 Besançon, France
3. Université de Picardie Jules Verne, CRP-CPO, UR7273, 1, Chemin du Thil – CS 52 501 – 80025 Amiens Cedex 1 ; emilie.loup-escande@u-picardie.fr

Le Travail humain, tome 85, nº 4/2022,

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

to understand what can be positive, useful, and sustainable for the post-crisis period in order to conduct ergonomic analysis preparations more efficiently within a design office where the stakeholders are not all specialized in ergonomics. A better use of existing simulation tools in design office, like virtual reality, could be a new way of working to perform ergonomic analysis.

Keywords: *ergonomics, work organization, resilience, crisis.*

RÉSUMÉ

La préparation des analyses ergonomiques est une étape cruciale en bureau d'études, durant laquelle est pratiquée l'ergonomie de conception et où l'activité future est anticipée au travers d'outils de simulation. Dans ce contexte, l'enjeu est de définir le meilleur niveau de représentativité de la situation simulée afin d'assurer une haute valeur écologique de l'analyse. L'étape de préparation est d'autant plus complexe à maîtriser lorsqu'elle doit fédérer, en bureau d'études, des acteurs-métiers non sensibilisés aux analyses ergonomiques, à leur intérêt et à leur impact sur les produits conçus. Or, il peut arriver que les entreprises soient conduites à adapter des processus de préparation des analyses ergonomiques, du fait de circonstances inattendues. Ceci a été le cas lors de la crise sanitaire liée à la COVID-19 qui a entraîné un changement inopiné et brutal des organisations de travail dans de nombreuses entreprises, tous secteurs confondus : ralentissement ou arrêt de production, télétravail de masse, rupture des échanges physiques touchant aussi bien le flux de personnes que le flux de matériels, etc. Cette crise majeure a fait vaciller des écosystèmes jusque-là considérés comme fiables et stables. Elle a aussi permis, par effet de résilience, de mettre en place de nouveaux modes de travail en s'adaptant. Dans cet article, nous nous intéressons au bureau d'études « maintenabilité » dans le secteur industriel aéronautique. Nous comparons l'organisation déployée et les protocoles associés pour préparer des analyses ergonomiques évaluant l'activité de maintenance, avant et pendant la crise sanitaire, notamment lors du premier confinement imposé de mars à avril 2020. Nous identifierons ce qui a été positif, utile et pérennisable pour l'après-crise et qui a concouru à rendre les préparations d'analyses ergonomiques plus efficaces et efficientes au sein d'un bureau d'études où les acteurs-métiers ne sont pas tous spécialisés en ergonomie.

Mots-clés : *ergonomie, organisation du travail, résilience, crise.*

INTRODUCTION

La conception de produit inclut de plus en plus la prise en compte de l'utilisateur très tôt dans le processus de conception, notamment au travers de l'ergonomie (Buisine et al., 2018 ; Kolus et al., 2018). Cette prise en compte s'ajoute à de nombreuses contraintes techniques déjà imposées aux concepteurs, qui doivent donc en permanence faire des choix et des compromis (Broberg, 2007). Ces compromis sont d'autant plus difficiles à aborder que l'ergonomie reste parfois trop méconnue au sein des

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

bureaux d'études (Bernard et al., 2019a). D'une part, l'intérêt de cette discipline n'est pas évident pour les concepteurs qui sont formés principalement à la conception mécanique ; d'autre part, la présence d'ergonomes en bureaux d'études reste très faible. Le déséquilibre entraine un rapport de force parfois insoluble pour faire valoir les exigences ergonomiques face aux critères mécaniques. Les ergonomes pratiquant l'ergonomie de conception en bureau d'études doivent souvent faire face à un manque de considération, passant une partie de leur temps à faire de la pédagogie pour expliquer leur métier au détriment d'analyses ergonomiques (Bellegham, 2018). Cette activité pédagogique commence très tôt dans le processus, avant même la réalisation des analyses ergonomiques. En effet, la notion de conception induit que le produit fini n'existe pas *a priori*. L'analyse ergonomique s'appuie donc sur des phases de simulation, articulées avec les phases de conception. La simulation, qu'elle soit réalisée sur des maquettes physiques ou digitales comme les technologies de réalité virtuelle, nécessite la construction et l'application de protocoles de mise en œuvre. Il faut préparer les maquettages physiques et/ou digitaux pour assurer leur représentativité, recruter les participants qui joueront le rôle des futurs utilisateurs, fédérer les différents acteurs-métiers du bureau d'études qui seront impactés par les résultats de l'analyse. Cette préparation, impliquant la disponibilité de ressources humaines, matérielles et financières, peut constituer un frein à l'intégration d'exigences ergonomiques pendant les phases de conception, surtout lorsque les interlocuteurs ne sont pas convaincus des apports de l'ergonomie de conception (Broberg, 2007).

Au-delà de ces freins, la crise sanitaire liée à la « COVID-19 » est un facteur exogène qui a bouleversé ces processus de préparation, impactant et fragilisant le secteur industriel (Belhadi et al., 2021 ; Spieske & Birkel, 2021). Cette crise a entraîné une baisse de la production de nombreux produits, induisant une décroissance généralisée et massive, voire inédite, de la consommation. Quand bien même la demande de production fut forte, le confinement de très nombreux pays dans le monde (Parmet & Sinha, 2020) a amené inexorablement une baisse des capacités de production (Chesnais, 2020). Cela a obligé certains dirigeants - pour ceux qui en ont eu la possibilité - à revoir leur organisation pour maintenir une activité, certes limitée, mais permettant néanmoins de ne pas sombrer dans une spirale économique négative qui deviendrait rapidement insurmontable. Dans cette situation inédite, de nombreuses structures industrielles ont innové, dans l'urgence, en mettant en place des organisations spécifiques afin de pérenniser leurs activités dans ce contexte socio-économique difficile.

C'est dans ce contexte de résilience que notre étude s'inscrit, au sein même du bureau d'études d'une industrie aéronautique française, plus particulièrement dans le département « maintenabilité ». Ce département a pour mission de concevoir la maintenance des aéronefs qui sera opérationnalisée par les clients. Ceci nécessite de réaliser des analyses ergonomiques durant les phases de conception. Le processus de préparation des

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

analyses ergonomiques a dû être adapté au contexte de la crise COVID-19, notamment au premier confinement entre mars et avril 2020. Observant assez rapidement un écart de performance du déploiement du protocole de préparation, pré et post-confinement, nous avons souhaité qualifier et quantifier l'activité de préparation d'analyses ergonomiques au sein de cette industrie. Dans ce papier, nous définirons tout d'abord les objectifs du département « maintenabilité ». Nous détaillerons ensuite le protocole que nous avons déployé pour observer la préparation d'analyses ergonomiques avant et pendant le confinement. Nous analyserons ensuite les résultats du recueil de données avant de les discuter et de les mettre en perspective.

I. CONTEXTE GENERAL DE L'ÉTUDE

Missions du Bureau d'études « maintenabilité »

Notre étude se déroule dans un département *bureau d'études « maintenabilité »* d'un constructeur aéronautique français. Ce département a pour vocation de concevoir et d'améliorer les activités de maintenance réalisées par les clients sur les aéronefs. Ce département est en interface avec tous les autres départements (aérodynamique, intégration électrique ou encore intégration hydraulique) qui proposent également des améliorations. Ainsi, les propositions d'amélioration que fait le bureau d'études « maintenabilité » sont confrontées à celles des autres départements afin de tendre vers la meilleure solution d'optimisation de l'activité de maintenance. En particulier, ce bureau d'études : (a) optimise l'architecture des aéronefs pour favoriser l'activité future des opérateurs de maintenance, (b) développe et optimise des outillages pour faciliter la maintenance des aéronefs lorsque le design ne permet pas à lui seul de réaliser la tâche, (c) optimise la rédaction des procédures pour guider les opérateurs de maintenance. Ce bureau d'études est constitué d'ingénieurs-concepteurs et de spécialistes en ergonomie. La mixité entre ces deux métiers est essentielle puisqu'elle permet d'échanger et de mieux comprendre, d'une part, les contraintes techniques et, d'autre part, les contraintes liées aux exigences ergonomiques découlant directement de l'activité des opérateurs de maintenance.

Mais, pour connaître, étudier et comprendre l'activité des opérateurs, il est nécessaire et indispensable de les observer. Ces observations touchent toutes les tâches de maintenance, qu'elles soient récurrentes ou non, complexes ou non. Ces observations doivent également permettre de comprendre comment les clients peuvent travailler et ainsi anticiper leurs activités futures. En effet, certaines difficultés ne peuvent pas être anticipées en bureau d'études sans le déploiement de simulation et d'analyses ergonomiques associées. La maintenance d'un aéronef peut en effet se faire dans des contextes très variés, touchant les dimensions environnementales, organisationnelles et matérielles, mais aussi les caractéristiques

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

des opérateurs en termes de savoir, de savoir-faire ou encore de caractéristiques physiologiques (fatigue, acuité visuelle, résistance à l'effort, etc.). Par conséquent, l'observation des tâches par la voie de la simulation pendant les phases de conception, représentant un contexte client, n'est possible que par l'association de trois conditions indispensables.

La mise en place de simulations pour « connaître » une situation de travail dont l'observation réelle est impossible (Béguin & Weill-Fassina, 1997)

Ces simulations de tâches de maintenance doivent tenir compte de la réalité du client (par exemple, contrôle du temps d'exécution, des outillages disponibles ainsi que du nombre d'opérateurs parfois limité pour faire une tâche complexe). Avec une représentation réaliste de la vie du client, la simulation permet également « d'agir » au plus tôt dans le processus de conception afin que des modifications soient apportées sur l'architecture du produit, sur les outillages ou encore sur la procédure de maintenance. La simulation permet finalement « d'interagir » autour de la notion sociale, c'est-à-dire que chaque ingénieur-concepteur du bureau d'études travaillant sur un système peut connaître et comprendre les attentes de chacun en vue de faciliter un compromis technique. Dans notre cadre industriel, l'étude menée porte principalement sur des situations existantes qu'il faut améliorer. Nous sommes donc dans le cadre de simulations dites « réflexives » qui permettent de bien comprendre les situations de travail en déployant un protocole ergonomique (Bobillier-Chaumon et al., 2018). Cette simulation « réflexive » peut tendre vers une simulation « prospective », c'est-à-dire sur une situation qui n'existe pas encore. Dans le cadre du bureau d'études elle permet ainsi d'anticiper de futures difficultés et ainsi proposer des solutions en amont (Bobillier-Chaumon et al., 2018).

La participation d'opérateurs de maintenance avec une expérience client

L'entreprise dans laquelle se trouve le bureau d'études « maintenabilité » conçoit, développe, produit et maintient les aéronefs. Nous retrouvons ainsi, sur ce site industriel, des opérateurs de maintenance qualifiés qu'il est possible de rencontrer et de mobiliser dans les simulations. Également, les opérateurs sélectionnés ont tous une expérience client avant d'arriver au sein de l'entreprise. Ce paramètre nous permet de recueillir un retour d'expériences riches et variés sur toutes les situations de travail simulées.

Le déploiement de matériels spécifiques pour réaliser ladite simulation

Dans notre bureau d'études « maintenabilité », deux outils de simulation permettent la participation d'opérateurs réels : les systèmes de réalité virtuelle et les maquettes physiques. Ces deux outils ont fait l'objet de

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

nombreux travaux et sont vus comme une solution efficace pour l'évaluation et la prise de décisions autour d'exigences venant de plusieurs métiers, notamment de la mécanique mais aussi de l'ergonomie (Craig et al., 2009 ; Lorisson, 2010). De plus, des travaux ont pu montrer tout le potentiel de ces outils pour la réalisation d'analyses ergonomiques, notamment pour la conception de situations de travail, de postes de travail en y impliquant directement les opérateurs (Bayramzadeh et al., 2018 ; Bellies & François, 2016 ; Garza et al., 2013 ; Sagnier, 2019 ; Seth et al., 2011).

Ce contexte de simulation, avec des outils dédiés et la participation d'opérateurs, est donc favorable à une remontée d'informations régulières pour l'ingénieur-concepteur en maintenabilité et dans le reste du bureau d'études. Cependant, et c'est l'objet même de notre article, pour réaliser une observation ergonomique pertinente et efficace au travers d'outils de simulation, le spécialiste en ergonomie appuyé par l'ingénieur-concepteur en maintenabilité, déploie un protocole afin de conceptualiser l'activité de l'opérateur et préparer l'analyse ergonomique au travers de la simulation. Ces protocoles sont parfois complexes à mettre en place et demandent une synergie entre plusieurs départements du bureau d'études, mais également avec l'atelier de maintenance qui gère les disponibilités des opérateurs, des aéronefs, voire des outils de simulation. Nous décrivons cette préparation dans la section suivante.

Préparation des analyses ergonomiques

Notre étude se concentre sur la phase de préparation des analyses ergonomiques. Elle est primordiale dans la mesure où elle détermine la valeur écologique de la simulation et donc sa représentativité vis-à-vis du monde réel. Afin de fédérer tous les acteurs-métiers qui devront aider à la préparation, il est important d'établir un document clair et compréhensible par tous, incluant ainsi les non-spécialistes en ergonomie. En effet, ce protocole est lu par des interlocuteurs venant de divers horizons au sein du bureau d'études (atelier de maintenance, bureau d'études mécaniques, atelier, etc.), et ayant peu ou pas de connaissances en ergonomie. Il convient dès lors de le rédiger de manière pédagogique pour deux raisons distinctes. D'une part, la mission de l'ergonome doit être comprise pour obtenir l'adhésion de tous les interlocuteurs qui vont devoir mettre à disposition du matériel, des opérateurs etc. D'autre part, la bonne compréhension des critères ergonomiques est essentielle pour qu'ils soient tous acceptés et respectés. Par exemple, pour l'étude des postures, des efforts, ou encore de l'accessibilité, il est nécessaire de respecter la norme NF EN ISO 15537 (AFNOR, 2005) intitulée « Principes de sélection et d'utilisation des personnes d'essai pour le contrôle des aspects anthropométriques des produits et modèles industriels ». Cette norme induit donc, pour les systèmes complexes, l'observation de trois opérateurs de statures différentes. En effet, en maintenance, l'accessibilité est souvent très contrainte par l'environnement physique ; un opérateur de petite taille aura très souvent un comportement, une gestuelle, ou une stratégie diffé-

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

rents de ceux d'un opérateur de grande taille (Di Gironimo et al., 2004 ; Shi & Liu, 2012 ; Regazzoni & Rizzi, 2014). De plus, le niveau d'expérience de l'opérateur doit être connu car ce critère joue sur le comportement de l'opérateur dans l'acte de maintenance. Par exemple, un opérateur qui a de longues années d'expérience pourra parfaitement critiquer les procédures de maintenance, eu égard aux différentes situations de travail qu'il a vécues pour une même tâche (Zafiharimalala & Tricot, 2009).

Ainsi, afin de rationaliser les informations et les critères partagés, le protocole envoyé à tous les interlocuteurs est « commun ». En d'autres termes, quels que soient la tâche de maintenance et l'aéronef sélectionné, le département « maintenabilité » émet à chaque fois la même demande. Cette demande est commune et regroupe des critères simples que chaque interlocuteur peut comprendre, quel que soit son domaine de compétence. En effet, la mise en place d'un protocole doit être structurée et homogène pour assurer des simulations efficaces en vue de réaliser une analyse ergonomique (Béguin & Weill-Fassina, 1997 ; Rabardel et al., 2014). Dans le protocole déployé ici, les critères sont au nombre de cinq, tous résumés dans le Tableau 1.

TABLEAU 1. Critères composant le protocole ergonomique commun envoyé à tous les interlocuteurs pour permettre la faisabilité et la préparation des analyses ergonomiques.
TABLE 1. Indicators included into the common ergonomic protocol sent to all stakeholders to allow the feasibility and preparation of ergonomic analyzes.

Cible	Critères	
Opérateur de maintenance	Stature	Trois opérateurs sélectionnés en fonction de leur stature • 1m60 • 1m70 • 1m85
	Expérience	10 ans d'expérience minimum, chez un client, sur la maintenance des tâches à observer
	Expérience	Utilisation et connaissance de la documentation client
Aéronefs	Représentativité	Dernière version de l'aéronef, version disponible chez les clients
Environnement de travail	Représentativité	La tâche de maintenance sera réalisée dans les conditions classiques vécues chez le client : praticables, éléments de sécurité disponibles, hangar adapté ou zone extérieure adaptée, outillages, ressources humaines

Le protocole ainsi rédigé se réfère directement aux caractéristiques attendues dans la norme, de façon à faciliter les échanges et respecter les critères. Le type d'outil de simulation (réalité virtuelle ou maquette physique) qui sera utilisé est également précisé dans le protocole. En effet, la maquette physique peut nécessiter quelques modifications pour être parfaitement représentative du contexte client. La réalité virtuelle peut,

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

quant à elle, nécessiter l'apport d'éléments physiques pour réduire l'écart entre réel et virtuel.

Adaptation de la préparation des analyses ergonomiques en situation de crise

Le processus de préparation a été bousculé par les changements organisationnels imposés par le premier confinement imposé en 2020. Afin de mesurer l'impact de ce facteur exogène sur le processus de préparation, notre expérimentation se base sur l'observation de la préparation des analyses ergonomiques avant et pendant le premier confinement au travers d'un recueil de données. En effet, l'entreprise dans laquelle nous avons mené l'étude a fait face et été résiliente en adaptant immédiatement l'organisation des préparations des analyses ergonomiques (Altintas, 2020 ; Frimousse & Peretti, 2021). Il convient dès lors de détailler les conditions de travail pendant ces deux périodes, notamment les éléments qui permettent le déploiement des analyses ergonomiques. Nous retenons les trois éléments qui présentent le plus de changements avant et pendant la crise, pouvant ainsi impacter la préparation des analyses ergonomiques : le télétravail, le travail sur site et les gestes de sécurité. Le Tableau 2 détaille les conditions de travail qui y sont associées.

Tableau 2. Conditions de travail au sein de l'industrie avant et pendant le premier confinement de la crise sanitaire.
Table 2. Working conditions in the industry before and during the first lockdown of the health crisis.

	Période classique (avant la crise)	Confinement généralisé (pendant la crise)
Télétravail	Ponctuel	Généralisé
Travail sur site	Généralisé	Ponctuel, dérogatoire
Gestes de sécurité	Equipement de protection individuelle adapté à la situation de travail	– Equipement de protection individuelle adapté à la situation de travail – Limite du nombre de personnes autour de la zone de travail – Port de masque chirurgical obligatoire (jamais porté pour d'autres raisons que celles liées à la crise sanitaire). – Distanciation de 1 mètre – Mise à disposition de solution hydro-alcoolique

La question soulevée dans cet article est de déterminer dans quelle mesure l'influence d'un facteur exogène (ici, la crise de la COVID-19) peut être bénéfique au processus de préparation de protocoles d'analyses ergonomiques, dans le cadre de l'industrie aéronautique.

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

II. MÉTHODE

Afin de comparer la préparation des analyses ergonomiques menées au sein du bureau d'études « maintenabilité » avant et pendant le premier confinement, nous basons notre observation sur le respect du protocole commun utilisé par tous les interlocuteurs, qui vise à mettre en place les aspects matériels et humains de la future analyse ergonomique. L'observation se base sur le suivi d'indicateurs que nous avons notés et enregistrés. Pour l'observation avant la crise, nous avons travaillé *a posteriori* en étudiant tous les échanges mails et les résultats obtenus des analyses ergonomiques réalisées et enregistrées avant la crise. Pendant la crise, nous avons fait un travail quotidien pour récolter les données provenant des mails et pouvoir ainsi noter les indicateurs. Durant ces deux périodes d'observation, les acteurs-métiers du département « maintenabilité » ayant envoyé des protocoles communs sont deux spécialistes en ergonomie. Les deux ont une expérience dans le service de 4 (± 1.4) années. Le Tableau 3 résume les conditions d'observation. Le terme « nombre d'analyses » correspond au nombre d'analyses ergonomiques réalisées et qui ont donc, pour chacune, été déployées au travers du protocole commun.

TABLEAU 3. Conditions d'observation avant et pendant le premier confinement général de la crise COVID-19.
TABLE 3. Observation conditions before and during the first general lockdown of the COVID-19 crisis.

	Situation classique (AVANT LA CRISE)	Confinement généralisé (PENDANT LA CRISE)
Nombre d'analyses (n)	23	26
Période d'analyses (Mois - Année)	Janvier/février 2020	Mars/avril 2020
Durée d'observation (semaines)	6	6

Les indicateurs sont répartis en deux catégories permettant le recueil de données afin de mesurer la préparation des analyses ergonomiques avant et pendant la crise. Nous nous sommes particulièrement appuyés sur plusieurs indicateurs, appelés variables, servant à évaluer le niveau de collaboration dans des équipes (Al Khatib, 2015 ; Djouad, 2011 ; Germani et al., 2012).

Les indicateurs de préparation de l'analyse ergonomique sont :

– (a) Temps global entre la demande initiale et la réalisation de l'observation, tenant compte de la préparation de l'outil de simulation, en jours ouvrés ;
– (b) Le nombre d'interlocuteurs ; cette donnée est d'autant plus importante qu'elle peut contribuer à influencer le temps global lors de l'activité de préparation de l'analyse ergonomique ;
– (c) L'usage de la réalité virtuelle (si la réponse est négative, la maquette physique est utilisée).

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

Les indicateurs de passation : vérifier la prise en compte, par les interlocuteurs, des indicateurs définis dans le Tableau 1.

Le Tableau 4 ci-après synthétise les catégories d'indicateurs, les indicateurs et leur métrique.

TABLEAU 4. Catégorie d'indicateurs et indicateurs de suivi de la préparation des protocoles ergonomiques pour réaliser des simulations d'activité de maintenance.
TABLE 4. Category of indicators and indicators for monitoring the preparation of ergonomic protocols in order to perform maintenance activity simulations.

Catégories	Indicateurs	Métriques
Indicateurs de préparation	Temps de préparation	Jours
	Nombre d'interlocuteurs	N
	Usage de la réalité virtuelle	0 = non 1= oui
Indicateurs de passation	Statures	0 = non 1= oui
	Expérience de 10 ans	0 = non 1= oui
	Connaissance de la procédure	0 = non 1= oui
	Représentativité zone de travail	0 = non 1= oui
	Représentativité environnement	0 = non 1= oui

Nous avons utilisé le test non-paramétrique de Mann-Whitney pour comparer, d'une part, tous les indicateurs avant et pendant la crise et, d'autre part, les indicateurs utilisés entre la réalité virtuelle et la maquette physique. Nous comparons ainsi deux groupes de données à chaque fois (un indicateur avant et pendant la crise). Nous avons également réalisé une analyse de variance (Anova) pour étudier la répartition des indicateurs sur les exigences de simulation avant et pendant la crise ainsi qu'à travers l'usage des outils de simulation. L'analyse de variance est préférée ici car nous comparons plus de deux groupes. L'analyse statistique a été réalisée dans SPSS 24.0 (IBM), et une valeur $p \leq .05$ a été considérée comme significative.

III. RÉSULTATS

Tout d'abord, nous comparons tous les indicateurs AVANT LA CRISE *versus* PENDANT LA CRISE. Le test de Mann-Whitney montre une différence significative entre les moyennes de sept indicateurs sur les huit observés. Plus particulièrement, l'indicateur « temps de préparation » est plus important AVANT LA CRISE avec une moyenne de 30.87 (± 6.21)

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

jours contre 17.31 (± 1.20) jours PENDANT LA CRISE ($Z = 2.74$; $p \leq .01$.). Également, le nombre d'interlocuteurs nécessaires pour mettre en place la simulation est significativement différent ($Z = 6.15$; $p \leq .001$.), passant de 6.00 (± 0.45) AVANT LA CRISE à 2.46 (± 0.25) PENDANT LA CRISE sanitaire. L'indicateur « usage de la réalité virtuelle » est présent uniquement AVANT LA CRISE et représente un tiers des simulations. Cela signifie donc que, AVANT LA CRISE la plus grande majorité des simulations a été réalisée à travers la maquette physique et entièrement avec cet outil PENDANT LA CRISE. Si nous examinons les indicateurs de passation, on constate que les indicateurs « stature » et « connaissance de la procédure » présentent des différences significatives, respectivement de 0.39 (± 0.25) et de 0.35 (± 0.25) contre 1,00 (± 0.00) pendant le premier confinement. C'est aussi le même constat pour l'indicateur « représentativité de l'environnement », avec 0.39 (± 0.13) AVANT LA CRISE contre 0,92 (± 0.14) PENDANT LA CRISE. Nous remarquons donc que ces trois indicateurs sont davantage pris en compte PENDANT LA CRISE qu'AVANT. Le Tableau 5 présente les résultats détaillés.

TABLEAU 5. Comparaison de l'ensemble des indicateurs de préparation et des critères demandés pour l'analyse ergonomique, avant et pendant le premier confinement général de la crise COVID-19.
TABLE 5. Comparison of all the preparation indicators and criteria requested for the ergonomic analysis, before and during the first general lockdown of the COVID-19 crisis. The non-parametric Mann-Whitney test was used.

		AVANT LA CRISE n = 23 Moyenne (ET)	PENDANT LA CRISE n = 26 Moyenne (ET)
Indicateurs de préparation	Temps de préparation **	30.87 (± 6.21)	17.31 (± 1.20)
	Nombre d'interlocuteurs ***	6.00 (± 0.45)	2.46 (± 0.25)
	Usage de la réalité virtuelle **	0.35 (± 0.25)	0
Indicateurs sur les exigences de simulation	Stature ***	0.39 (± 0.25)	1.00 (± 0.00)
	Expérience de 10 ans	1.00 (± 0.00)	1.00 (± 0.00)
	Connaissance de la procédure ***	0.35 (± 0.25)	1.00 (± 0.00)
	Représentativité zone de travail	0.78 (± 0.11)	0.92 (± 0.14)
	Représentativité environnement ***	0.39 (± 0.13)	0.92 (± 0.14)

Note. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

Pour aller plus loin, nous étudions la répartition des cinq indicateurs sur les exigences de simulation en fonction de leur prise en compte par les différents interlocuteurs en bureau d'études, AVANT et PENDANT LA CRISE, toutes observations confondues. Il apparaît des différences significatives entre les indicateurs AVANT LA CRISE. L'indicateur « besoin d'opérateurs avec une expérience minimum de 10 ans » est pris en compte dans toutes les observations. En revanche, l'indicateur « opérateurs ayant une bonne connaissance de la procédure » est le moins respecté (0.35 ± 0.25). La Figure 1 résume les résultats.

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

Concernant la répartition de ces mêmes indicateurs PENDANT LA CRISE, nous n'observons pas de différence significative. Nous pouvons

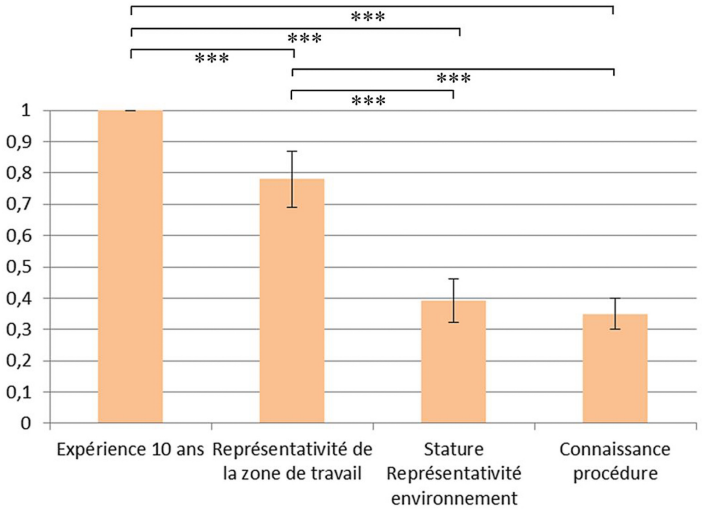


Figure 1. Répartition des indicateurs sur les exigences de simulation en fonction de la prise en compte de chacun d'eux avant la période de crise COVID-19, toutes observations confondues (*** $p \leq .001$.).
*Fig. 1. Distribution of the indicators on the simulation requirements according to the consideration of each of them before the COVID-19 crisis period, all observations combined (*** $p \leq .001$.).*

tout de même remarquer que trois indicateurs ont été pris en compte à chaque demande (stature, expérience de 10 ans, connaissance de la procédure). Pour les deux autres indicateurs (représentativité zone de travail, représentativité environnement), la prise en compte est légèrement plus faible (0,92 ± 0.14).

Pour approfondir/aller plus loin, nous avons examiné s'il existe un effet « outil de simulation » sur la mise en place des protocoles ergonomiques communs. La Figure 2 montre les deux outils qui ont été utilisés : (a) une maquette physique représentant fidèlement un hélicoptère à échelle 1:1, (b) une plate-forme de réalité virtuelle comprenant quelques éléments physiques pour réduire l'écart entre le monde virtuel et le monde réel (Bernard et al., 2019b).

La comparaison statistique entre la moyenne de tous les indicateurs, AVANT LA CRISE, et PENDANT LA CRISE, présente pour cinq d'entre eux un écart significatif selon le test de Mann-Whitney. Tout d'abord, l'indicateur de « temps de préparation » est plus court à travers l'outil de réalité virtuelle : 15.00 (± 0.00) jours, contre 25.63 (± 6.04) jours avec la maquette physique ($p \leq .01$.). Le « nombre d'interlocuteurs » est, en revanche, plus élevé avec la réalité virtuelle qu'avec la maquette physique ($p \leq .001$.), respectivement de 7.00 (± 0.00) contre 3.48 (± 0.74). Cet indicateur ne semble pas avoir été influencé par la crise puisque la réalité virtuelle a été uniquement utilisée AVANT LA CRISE. Les indicateurs sur

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)



Figure 2. Exemple d'outils de simulation : (a) une maquette physique à échelle 1, (b) une plateforme de réalité virtuelle.
Figure 2. Example of simulation tools: (a) a 1-scale physical model, (b) a virtual reality platform.

les exigences de simulation présentent également des différences significatives pour trois d'entre eux (statures, connaissance de la procédure, représentativité de la zone de travail). Pour ces trois indicateurs, leur prise en compte est nulle avec l'usage de la réalité virtuelle alors qu'avec la maquette physique le taux de prise en compte est élevé, respectivement de 0.88 (± 0.17), 0.85 (± 0.18) et 0.83 (± 0.19). Le Tableau 6 présente tous les résultats.

TABLEAU 6. Comparaison de l'ensemble des indicateurs de préparation et des critères demandés pour l'analyse ergonomique entre la réalité virtuelle et la maquette physique.
TABLE 6. Comparison of all the preparation indicators and criteria required for the ergonomic analysis between virtual reality and the physical model. The Mann-Whitney non-parametric test was used.

		Réalité virtuelle n = 9 Moyenne (ET)	Maquette physique n = 40 Moyenne (ET)
Indicateurs de préparation	Temps de préparation **	15.00 (± 0.00)	25.63 (± 6.04)
	Nombre d'interlocuteurs ***	7.00 (± 0.00)	3.48 (± 0.74)
Indicateurs sur les exigences de simulation	Stature ***	0	0.88 (± 0.17)
	Expérience de 10 ans	1.00 (± 0.00)	1.00 (± 0.00)
	Connaissance de la procédure ***	0	0.85 (± 0.18)
	Représentativité zone de travail	1.00 (± 0.00)	0.83 (± 0.19)
	Représentativité environnement ***	0	0.83 (± 0.19)

Note. ** $p \leq .01$. *** $p \leq .001$.

La répartition des indicateurs sur les exigences de simulation pour chacun des outils de simulation n'a pas engendré de différences significatives AVANT et PENDANT LA CRISE.

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

IV. DISCUSSION

Dans le contexte d'un bureau d'études « maintenabilité » dans le secteur aéronautique, notre étude visait à observer la variation des modes de préparation des analyses ergonomiques avant et pendant la crise sanitaire COVID-19, et plus particulièrement durant le premier confinement général. Cette étude a reposé sur la quantification de huit indicateurs répartis en deux catégories :

– Indicateurs de préparation de l'analyse ergonomique permettant d'évaluer l'organisation et l'efficacité de la mise en place de protocoles d'analyses ergonomiques : (a) temps de préparation entre la demande initiale et la réalisation de l'analyse, notamment le début de la simulation de l'activité, (b) nombre d'interlocuteurs pour préparer l'analyse, (c) utilisation de technologie de réalité virtuelle ou d'une maquette physique ;
– Indicateurs sur les exigences de la simulation permettant d'évaluer le respect des critères décrits dans le protocole ergonomique par l'ensemble des interlocuteurs, souvent non spécialistes en facteurs humains : (a) respect des trois statures des opérateurs souhaités (petit, moyen, grand), (b) expérience minimum de 10 ans des opérateurs sélectionnés, (c) bonne connaissance de la procédure de maintenance, (d) bonne représentativité de la zone de travail, (e) une bonne représentativité de l'environnement de travail global.

Précisons que la notion de représentativité est importante, car l'atelier de maintenance du constructeur ne reflète pas toutes les contraintes des clients (type et disponibilité des outillages, disponibilité des éléments de sécurité, etc.). Ainsi, nous sélectionnons des opérateurs de maintenance travaillant chez le constructeur pour les mettre en situations de travail similaires à celles rencontrées chez le client.

Avant la crise sanitaire, nous avons pu étudier, de mi-janvier à mi-mars 2020, 23 préparations d'analyses ergonomiques et 26 préparations pendant le premier confinement de la crise, de mi-mars à mi-mai.

Avant et pendant la crise : des résultats hétérogènes

Parmi les indicateurs de préparation, nous observons que l'indicateur de temps de préparation est significativement plus court PENDANT LA CRISE sanitaire qu'en situation classique. Nous pouvons imputer cet écart au nombre d'interlocuteurs pour préparer l'analyse ergonomique qui est plus faible PENDANT LA CRISE qu'AVANT. Par conséquent, du fait d'un nombre plus faible d'interlocuteurs, nous pouvons supposer que, d'une part, le nombre d'échanges a été plus restreint et, d'autre part, que les informations et directives véhiculées par chacun ont été mieux maîtrisées et moins dispersées (Coenen & Kok, 2014). Il en résulte que la préparation de l'analyse y est plus efficiente PENDANT LA CRISE sanitaire.

Nous observons aussi des différences quant à la prise en compte des indicateurs portant sur les exigences de la simulation et, de fait, sur les

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

critères du protocole. Tout d'abord, les cinq indicateurs sont mieux pris en compte PENDANT LA CRISE, comparativement à la situation antérieure. Plus particulièrement, les trois indicateurs relatifs aux opérateurs, à savoir la stature, le niveau d'expérience et la connaissance de la procédure, sont tous pris en compte au cours des 26 observations. Avant la crise, seul l'indicateur lié à l'expérience de 10 ans a été entièrement maintenu dans la mesure où chez les constructeurs aéronautiques, beaucoup d'opérateurs ont été formés directement dans l'entreprise pour y faire carrière, ou recrutés à l'extérieur pour leur grande expérience. Il y a donc une proportion importante d'opérateurs ayant au moins 10 ans d'expérience, permettant ainsi de répondre facilement à notre exigence dans notre protocole ergonomique, qu'il soit appliqué AVANT ou PENDANT LA CRISE.

En revanche la valeur des indicateurs de stature et de connaissance de la procédure est significativement plus faible AVANT le premier confinement. Concernant l'indicateur de stature qui, rappelons-le, stipule la participation de trois opérateurs de tailles différentes, il impose une contrainte logistique lourde au chef d'atelier gérant l'activité de maintenance. En effet, même si ce dernier adhère au protocole et à la démarche globale que représente l'analyse ergonomique, il doit accepter de laisser participer trois opérateurs et donc de perdre temporairement trois ressources effectuant les missions quotidiennes de l'atelier. Cela bouscule inévitablement les plannings de maintenance prédéfinis, les délais, les indicateurs de performance de l'atelier (Kinnison, 2004). En outre, chez un constructeur aéronautique, seuls quelques opérateurs connaissent et exploitent la procédure dédiée au client. C'est ce constat qui explique qu'AVANT LA CRISE, cet indicateur a été moins respecté. PENDANT LA CRISE, nous avons observé une grande disponibilité des opérateurs liée à une baisse d'activité de la maintenance.

L'indicateur de représentativité de la zone de travail (et donc l'hélicoptère lui-même) ainsi que celui de l'environnement ont été évalués en vérifiant que la zone d'études est parfaitement représentative de celle des clients. En effet, l'analyse ergonomique est réalisée chez le constructeur où les zones de travail peuvent différer de celles des clients (outillages, moyen d'accès et de sécurité, version de l'hélicoptère, etc.). Dans notre étude, ces indicateurs présentent des différences qui sont même significatives pour l'indicateur de représentativité de l'environnement, montrant une prise en compte plus forte de cet indicateur pendant le premier confinement lié à la crise. Concernant la représentativité de la zone de travail, la différence n'est pas significative. Cependant, cet indicateur est mieux pris en compte pendant le premier confinement. À ce stade, au travers de nos résultats, seul le non-usage de la réalité virtuelle au profit de la maquette physique PENDANT LA CRISE pourrait expliquer une représentativité plus élevée de la zone de travail et de l'environnement de travail. De plus, l'usage de la maquette physique à échelle 1:1 est réputé pour apporter un niveau très élevé de représentativité (Bellies & François, 2016 ; Das & Sengupta, 1996 ; Theureau, 1997). Cela induit un haut niveau de validité écologique, c'est-à-dire que l'écart entre la situation de travail simulée et la situation de travail réelle est faible (Hoc, 2001). De

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

plus, un opérateur n'a quasiment aucun temps d'adaptation, sans besoin de formation, lorsque la maquette est fonctionnelle avec un très haut niveau de détail comme c'est le cas dans notre situation industrielle (Bernard et al., 2019b).

Cependant, l'usage de la réalité virtuelle nous intéresse tout particulièrement puisqu'il permet de s'affranchir d'une contrainte éminemment complexe, la disponibilité d'un aéronef à échelle 1:1. La partie qui suit vise donc à discuter nos résultats qui comparent la préparation des analyses avant et pendant le premier confinement.

La réalité virtuelle, une alternative aux contraintes de la simulation physique

À partir de ces premiers constats, nous avons décidé de comparer l'ensemble des indicateurs en fonction de l'usage de la réalité virtuelle ou de la maquette physique. Avec l'usage de la réalité virtuelle, l'indicateur de temps de préparation est significativement plus court qu'avec la maquette physique. Cette observation confirme l'efficacité des technologies de réalité virtuelle. Celles-ci permettent, en effet, de se substituer à la mise en place de maquettes physiques, souvent coûteuses et longues à mettre en conformité pour réduire l'écart entre situation simulée et situation réelle (Bernard et al., 2019b). En revanche, le nombre d'interlocuteurs est plus nombreux avec la réalité virtuelle qu'avec la maquette physique. Cependant, cet indicateur ne semble pas avoir été influencé par la crise puisque la réalité virtuelle a été uniquement utilisée avant la crise. Concernant les indicateurs relatifs aux exigences de simulation, trois d'entre eux n'ont pas été pris en compte pour l'ensemble des simulations réalisées avec la réalité virtuelle, à savoir la stature, la connaissance de la procédure et la représentativité de l'environnement. En effet, les indicateurs de stature et de connaissance de la procédure sont des indicateurs propres aux opérateurs sélectionnés. La réalité virtuelle ayant été déployée avant la crise sanitaire, le choix des opérateurs à cette période était beaucoup plus réduit comme expliqué dans la section précédente. Également, la non-représentativité de l'environnement est un constat dépendant de l'outil de réalité virtuelle. Nous pouvons l'expliquer par le manque de connaissance en ergonomie de la part des concepteurs en bureau d'études, ne leur permettant pas de se poser les questions touchant à l'activité future de l'opérateur pendant les phases de conception et de développement et donc de préparation des analyses ergonomiques. Nous pouvons particulièrement citer les travaux de Broberg (2007) et ceux de Bernard et al. (2019a) qui expriment le besoin de poursuivre les efforts de pédagogie autour de l'ergonomie au sein d'une population en bureau d'études peu encline à sa prise en compte. Ainsi, les environnements de travail, autour du produit, sont très rarement modélisés et donc faiblement accessibles en réalité virtuelle. En revanche, ces mêmes concepteurs développent des modèles 3D très aboutis des produits qu'ils conçoivent. Cela explique d'ailleurs que l'indicateur de représentativité de la zone de travail (l'aéronef lui-même) a été entièrement pris en

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

compte avec l'outil de simulation digitale. Nous observons, à l'inverse, une proportion plus faible de prise en compte de cet indicateur avec la maquette physique. En effet, la zone de travail sur maquette physique, pour être représentative, nécessite d'arborer un haut niveau de détail, ce qui a été le cas dans la majorité des situations observées, excepté pour certaines sur lesquelles il manquait certains tuyaux hydrauliques par exemple. Or, la maintenance sur aéronef étant complexe du fait des nombreux éléments à maintenir et l'exiguïté des environnements, chaque détail structurel peut impacter l'accessibilité et donc l'activité de l'opérateur (AFIM, 2004 ; Latorella & Brabhu, 2000 ; Chang & Wang, 2010). Ce manque de détails peut, *in fine*, lors de l'analyse ergonomique qui suivra la préparation, réduire la validité écologique et donc fausser les résultats globaux qui pourraient entraîner de mauvaises décisions dans les choix de conception du produit.

Nos résultats sont donc contrastés, certains d'entre eux dépendant du changement d'organisation de travail à la suite de la crise de la COVID-19, d'autres dépendant davantage de l'outil de simulation et plus particulièrement de l'usage de la réalité virtuelle ou de la maquette physique. Deux axes de travail émergent de notre analyse :

– La préparation de l'analyse ergonomique doit être homogène quels que soient le contexte et le changement d'organisation. Pour aller plus loin et gagner l'adhésion de la démarche ergonomique auprès des non spécialistes, nous pouvons proposer une « formation-action » à l'analyse ergonomique auprès de tous les participants (Daniellou & Martin, 2007 ; Girardot & Forrierre, 2017). Ils pourront ainsi mieux percevoir les enjeux de la future analyse ergonomique voire y participer en soutenant l'action même de l'ergonome.
– L'usage de la maquette physique ou de la réalité virtuelle présente des différences qu'il convient de parfaitement maîtriser dès la préparation de l'analyse ergonomique sous peine de fausser très tôt les futurs résultats de l'analyse elle-même (Bernard et al., 2019b).

Télétravail et réalité virtuelle : vers une nouvelle approche de la préparation de l'analyse ergonomique en contexte distanciel

L'usage de la réalité virtuelle associé aux caractéristiques du télétravail observées PENDANT LA CRISE pourrait être un couple optimal en termes d'efficacité d'une part et de performance d'autre part, pour la mise en place d'analyses ergonomiques en contexte industriel.

Tout d'abord, nous avons observé que la mise en place généralisée du télétravail permettrait une forte réduction du nombre d'interlocuteurs ainsi que du temps de préparation des analyses ergonomiques. Ce constat est partagé par l'étude de Coenen et Kok (2014) qui a montré que le télétravail entraînait des réunions plus courtes, plus efficaces et moins nombreuses induisant de meilleures performances dans le développement

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

de nouveaux produits. Ce constat est donc transposable dans le déploiement de la préparation d'analyses ergonomiques pour les rendre plus efficaces, avec moins d'incompréhensions ou encore moins d'échanges. Également, la prise en compte des indicateurs sur les exigences de simulation (respect des trois statures, une expérience minimum de 10 ans des opérateurs sélectionnés, une bonne connaissance de la procédure de maintenance, une bonne représentativité de la zone de travail, une bonne représentativité de l'environnement de travail global) semble être mieux respectée PENDANT LA CRISE sanitaire et donc en télétravail. Tous les interlocuteurs étant dans une dynamique de télétravail, ils semblaient plus enclins à répondre vite et mieux aux exigences du protocole ergonomique. Par conséquent, il y avait une réduction du temps de préparation que l'on pourrait par association, encore améliorer par l'usage de la réalité virtuelle comme outil de simulation pendant l'analyse ergonomique. Son usage engendre un temps de préparation plus court par rapport à la maquette physique, tout en assurant un haut niveau de représentativité (Coburn et al., 2017 ; De Sa & Zachmann, 1999). Cependant, le gain de temps généré par l'usage de la réalité virtuelle ne peut se faire que si l'ensemble des acteurs-métiers adhèrent à l'outil. La notion d'acceptabilité est donc essentielle et doit passer par des phases pédagogiques pour faire comprendre les atouts, mais aussi les points faibles de l'outil (Loup-Escande & Loup, 2021 ; Sagnier et al., 2019).

Au-delà du gain de temps, le télétravail peut être à l'origine d'une meilleure compréhension des objectifs et enjeux de la future analyse ergonomique. En effet, comme le décrit Ollivier (2017), le télétravail permet une répartition de charge de travail prédéfinie, mieux répartie qu'en travail physique où les échanges permanents dans l'environnement ultra-dynamique, augmentent la charge cognitive de travail. De manière générale, le télétravail a fait l'objet de nombreuses publications montrant ses bénéfices dans la performance en distanciel. Par exemple, l'étude de Karia et Asaari (2016) évoque la capacité de forte concurrence d'une entreprise déployant largement le télétravail, en suivant des règles précises et appliquées par tous les employés. Plus particulièrement, cette étude met en avant une capacité plus élevée à innover que d'autres entreprises ne déployant pas ou peu le télétravail. Nous pouvons également citer les travaux de Bloom et al. (2015) expliquant qu'un centre d'appels a relevé un taux de performance de 13 % supérieur lorsque l'ensemble des employés travaille depuis chez eux et non sur leur site habituel. Nous pouvons donc supposer que le télétravail, pour la préparation d'une analyse ergonomique, reste une situation de travail tout à fait pertinente. Néanmoins, le télétravail doit aussi être maîtrisé pour éviter des ruptures physiques, sociales et psychosociales pouvant être ainsi néfastes sur la santé de l'employé lui-même, mais aussi sur la performance au travail (Taskin & Tremblay, 2010). Certaines études soulèvent également les risques de surmenage, de burn-out ou encore bore-out dus à une mauvaise maîtrise du temps de travail chez soi, pouvant s'étaler sur des plages horaires élevées, ne créant ainsi aucune rupture entre vie privée et vie professionnelle (Durieux, 2020 ; Stich, 2020). Torten et al. (2016) évoquent également le risque lié à un management « de pression » mettant

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

en place bon nombre d'indicateurs afin de suivre coûte que coûte la performance des équipes loin de leur bureau. Si l'équilibre n'est pas trouvé, le risque de fracture entre management et employés peut être plus important et impactant que dans un contexte de rapprochement physique classique.

Le télétravail, associé à l'usage de la réalité virtuelle, est un couple qui apparaît comme efficace et pertinent pour réaliser des préparations d'analyses ergonomiques. Il doit cependant être cadré pour être pleinement efficient, d'autant que la finalité de cette préparation reste la réalisation de l'analyse ergonomique.

Limites et perspectives de l'étude

Notre étude a été menée au sein du département « maintenabilité » du bureau d'études d'une entreprise aéronautique. Cette restriction au seul département « maintenabilité » peut présenter un biais dans la mesure où d'autres départements réalisent également des analyses ergonomiques, telles que celles que mènent les concepteurs du cockpit ou de la cabine accueillant les passagers. Nous avons focalisé notre étude sur les analyses ergonomiques touchant les tâches de maintenance chez les clients qui, au sein de l'entreprise concernée, ne sont réalisées que dans le département « maintenabilité ». Si nous observons depuis quelques années l'apparition des technologies de réalité augmentée (Trout et al., 2018), elles restent peu présentes dans la pratique, qui plus est pour réaliser des analyses ergonomiques. C'est pourquoi, nous avons centré notre analyse sur l'usage de la réalité virtuelle.

Au regard de nos résultats, nous faisons l'hypothèse que, si la réalité virtuelle avait pu être utilisée PENDANT LA CRISE, le taux de prise en compte des indicateurs propres à l'opérateur aurait certainement été aussi élevé que pour la maquette physique, ces indicateurs ne dépendant pas directement de la technologie de simulation. La réalité virtuelle est, de plus, une technologie en constante évolution et qui s'est largement démocratisée ces dernières années en bureau d'études. Elle est aujourd'hui connue et maîtrisée par les populations composant les bureaux d'études, même si elle n'est pas spécifiquement utilisée pour réaliser des analyses ergonomiques. Ainsi, cette étude nous amène à proposer un modèle de l'articulation entre télétravail et réalité virtuelle, en particulier à des fins de préparation d'analyses ergonomiques (Figure 3). Il conviendra de l'éprouver au travers d'une méthodologie dédiée, après avoir cadré la notion de télétravail et avoir formé, sensibilisé les acteurs-métiers du bureau d'études à l'usage de la réalité virtuelle. Ce modèle, composé de trois étapes classiques correspondant au fonctionnement habituel d'une préparation d'analyse (Barcellini et al., 2013), intégre le télétravail et l'outil de réalité virtuelle :

– Etape 1 : Demande initiale (protocole ergonomique) envoyée par l'ergonome du département « maintenabilité ». Ce protocole est envoyé

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

par mail vers les interlocuteurs du bureau d'études de l'atelier de maintenance ;
- Etape 2 : Réponse aux exigences du protocole ergonomique par les interlocuteurs du bureau d'études de l'atelier de maintenance. L'échange avec l'ergonome se fait par visio-conférence. Les exigences sont indépendantes entre les différents interlocuteurs, ces derniers ne communiquent pas entre eux mais uniquement avec le demandeur initial et donc l'ergonome ;
- Etape 3 : Analyse ergonomique réalisée de manière collaborative avec la participation de l'opérateur, de l'ergonome du département « maintenabilité » et des interlocuteurs du bureau d'études impactés et dont les résultats de l'analyse ergonomique impacteront potentiellement leur conception. L'opérateur est obligatoirement immergé en réalité virtuelle avec, si possible, un dispositif haptique ou physique pour réduire l'écart entre le monde virtuel et le monde réel (Boy, 2019). L'opérateur partagera, avec l'ergonome et avec les concepteurs, son immersion, soit en visio-conférence, soit en les intégrant directement dans le monde virtuel comme spectateur. Cette dernière option suggère que l'ergonome et les concepteurs disposent d'une technologie de réalité virtuelle avec eux.

En synthèse, la Figure 3 détaille le processus idéal, dans un contexte distanciel, pour répondre aux exigences du protocole ergonomique commun émis par les ergonomes du département « maintenabilité ».

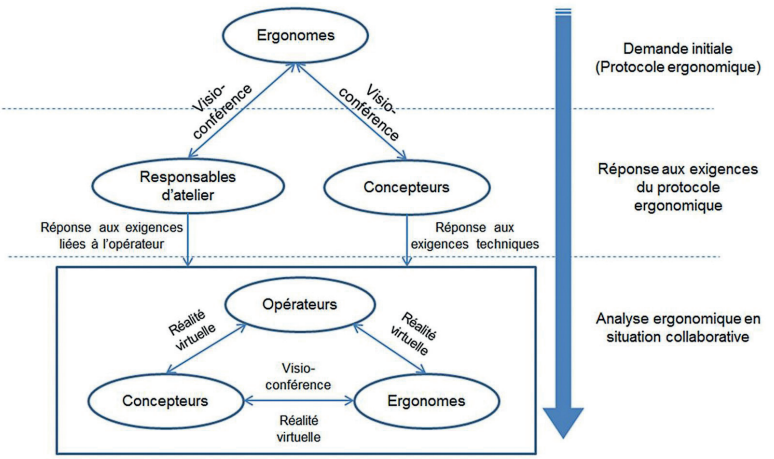


Figure 3. Modèle de la préparation d'une analyse ergonomique et de sa passation dans un contexte de travail distancié, en télétravail, en utilisant les technologies de communication de visio-conférence et les technologies de simulation de réalité virtuelle.
Figure 3. Conceptual model of the preparation of an ergonomic analysis and its performing in a context of teleworking, using videoconferencing communication technologies and virtual reality simulation technologies.

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

CONCLUSION

L'objectif de nos travaux a été d'analyser l'effet d'un facteur exogène (ici, le premier confinement imposé par la crise COVID-19) sur les indicateurs de préparation d'analyses ergonomiques réalisées au département « maintenabilité » d'un bureau d'études dans l'industrie aéronautique.

Notre étude a montré que le télétravail et l'usage de la réalité virtuelle peuvent former un couple performant pour réaliser des analyses ergonomiques à distance. Plus particulièrement, nous avons observé des temps de préparation plus courts, ainsi qu'un nombre d'interlocuteurs plus faible que dans un contexte de travail physique. Cependant, le télétravail doit se faire dans un contexte régulé et maîtrisé pour rester plus efficient et efficace qu'une situation de travail non distanciée, qui reste, dans les deux cas, une situation de travail collaborative. En effet, les savoirs et savoir-faire varient de l'ergonome au concepteur en passant par l'opérateur de maintenance. Ainsi, la mise en relation de chacun peut passer par des moyens purement digitaux : visio-conférence, mail, immersion en réalité virtuelle. L'orchestration des interlocuteurs ne sera en revanche performante que si le niveau de connaissance sur chacun de ces outils est suffisant. Plus particulièrement, la maîtrise technique de la réalité virtuelle est nécessaire pour assurer une validité écologique de la simulation la plus élevée possible.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Chaque auteur a directement contribué à cet article et en a approuvé la publication. Les contributions étaient les suivantes (FB pour Fabien Bernard, ELE pour Emilie Loup Escande) :

FB : Gestion de l'étude, conceptualisation, recueil de données, techniques statistiques appliquées aux données de l'étude, rédaction.

ELE : Conceptualisation, commentaires et révision.

RÉFÉRENCES

AFIM (2004). *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.

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).

Altintas, G. (2020). La capacité dynamique de résilience : l'aptitude à faire face aux événements perturbateurs du macro-environnement. *Management & Avenir*, *115*, 113-133. https://doi.org/10.3917/mav.115.0113

Al Khatib, A. (2015).*Conception collaborative du couple produit/usage : approche à travers des objets intermédiaires de conception*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne Franche-Comté.

Barcellini, F., Van Belleghem, L. & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités. *In* P. Falzon (Eds),

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

Ergonomie constructive (pp. 191-206). Paris, Puf.. https://doi.org/10.3917/puf.falzo.2013.01.0191

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. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.03.011

Béguin, P., & Weill-Fassina, A. (1997). De la simulation des situations de travail à la situation de simulation. *In* P. Béguin & A. Weill-Fassina (dir.). *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*. (pp. 5-28). Toulouse, Octarès.

Belhadi, A., Kamble, S., Jabbour, C. J. C., Gunasekaran, A., Ndubisi, N. O., & Venkatesh, M. (2021). Manufacturing and service supply chain resilience to the COVID-19 outbreak: Lessons learned from the automobile and airline industries. *Technological Forecasting and Social Change*, *163*. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120447

Belleghem, L. V. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives. *Activités*, *15*(15-1). https://doi.org /10.4000/activites.3129

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 51ème Congrès de la SELF*, Marseille.

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J. C., & Paquin, R. (2019a). Integration of human factors into the design process of helicopter maintainability. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, *29*(4), 350-360. https://doi.org/10.1002/hfm.20792

Bernard, F., Zare, M., Sagot, J.-C., & Paquin, R. (2019b). Using digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability. *Human Factors*, *62*(1), 37-54. https://doi.org/10.1177/0018720819861496

Bloom, N., Liang, J., Roberts, J., & Ying, Z. J. (2015). Does working from home work? Evidence from a Chinese experiment. *The Quarterly Journal of Economics*, *130*(1), 165-218. https//doi:10.1093/qje/qju032

Bobillier Chaumon, M. É., Rouat, S., Laneyrie, E., & Cuvillier, B. (2018). De l'activité de simulation à l'activité en simulation: simuler pour stimuler. *Activités*, *15*(1). https://doi.org/10.4000/activites.3136

Boy, G.A. (2019). From rigid to flexible –From virtual to tangible an evolution of human-centered design. *In* S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T., Fujita & Y. Alexander (Eds.) *Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018)*. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, *vol 824*. New York, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96071-5_6

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. https://doi.org/10.1002/hfm.20081

Buisine, S., Boisadan, A., & Richir, S. (2018). L'innovation radicale par la méthode de l'utilisateur extraordinaire. *Psychologie du Travail et des Organisations*, *24*(4), 374-386. https://doi.org/10.1016/j.pto.2017.11.001

Chang, Y. H., & Wang, Y. C. (2010). Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians. *Safety Science*, *48*(1), 54-62. https://doi.org/10.11113/sh.v2n2.410

Chesnais, F. (2020). L'état de l'économie mondiale au début de la grande récession Covid-19 : repères historiques, analyses et illustrations, *À l'Encontre, La Brèche*, 12 avril 2020.

Coburn, J. Q., Freeman, I., & Salmon, J. L. (2017). A review of the capabilities of current low-cost virtual reality technology and its potential to enhance the

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

design process. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, *17*(3). https://doi.org/10.1115/1.4036921

Coenen, M., & Kok, R. A. (2014). Workplace flexibility and new product development performance: The role of telework and flexible work schedules. *European Management Journal*, *32*(4), 564-576. https://doi.org/10.1016/j.emj.2013.12.003

Craig, A. B., Sherman, W. R., & Will, J. D. (2009). *Developing virtual reality applications: Foundations of effective design*. Elsevier, Morgan Kaufmann. https://doi.org/10.1016/C2009-0-20103-6

Daniellou, F., & Martin, C. (2007). La formalisation de l'intervention en ergonomie. Des contextes et des rencontres. *Éducation Permanente*, *170*, 63-76.

Das, B., & Sengupta, A. K. (1996). Industrial workstation design: a systematic ergonomics approach. *Applied Ergonomics*, *27*(3), 157-163. https://doi.org/10.1016/0003-6870(96)00008-7

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. https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00047-3

Di Gironimo, G., Monacelli, G., & Patalano, S. (2004). A design methodology for maintainability of automotive components in virtual environment, *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*.

Djouad, T. (2011). *Ingénierie des indicateurs d'activités à partir de traces modélisées pour un Environnement Informatique d'Apprentissage Humain*, Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, Université Mentouri-Constantine.

Durieux, E. (2020). Télétravail et confinement, vers une coexistence vivable. Rapport Technique, Ministère de l'intérieur, hal-02560409

Frimousse, S. & Peretti, J. (2021). Comment renforcer durablement la résilience organisationnelle ? *Question(s) de Management*, *35*, 127-174. https://doi.org/10.3917/qdm.215.0127

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, 154-160. https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.11.019

Germani, M., Mengoni, M., & Peruzzini, M. (2012). An approach to assessing virtual environments for synchronous and remote collaborative design. *Advanced Engineering Informatics*, *26*(4), 793-813. https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.06.003

Girardot, P., & Forrierre, J. (2017). Des apports d'une formation-action à l'analyse ergonomique du travail dans l'intervention ergonomique. Réflexions d'un praticien. *Activités*, *14*(2). https://doi.org/10.4000/activites.3033

Hoc, J.M. (2001). Towards ecological validity of research in cognitive ergonomics, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *2*(3), 278-288. https://doi.org/10.1080/14639220110104970

Karia, N., & Asaari, M. H. A. H. (2016). Innovation capability: The impact of teleworking on sustainable competitive advantage. *International Journal of Technology, Policy and Management*, *16*(2), 181-194. https://doi.org/ 10.1504/IJTPM.2016.076318

Kinnison, H. A (2004). *Aviation Maintenance Management*, New York, McGraw-Hill Professional.

Kolus, A., Wells, R., & Neumann, P. (2018). Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework. *Applied Ergonomics*, *73*, 55-89. https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.05.010

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. https://doi.org/10.1016/S0169-8141(99)00063-3

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)

Lorisson, J. (2010). Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus. *Techniques de l'ingénieur TE*, *5*, 965.
Loup-Escande E., & Loup G. (2021) Designing acceptable emerging technologies: what contribution from ergonomics? *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *22*(5), 581-602, https://doi.org/10.1080/1463922X.2020.1836568
Ollivier, D. (2017). Le succès du télétravail : les effets de la nouvelle loi Travail. *Études*, 33-46. https://doi.org/10.3917/etu.4244.0033
Parmet, W. E., & Sinha, M. S. (2020). Covid-19 –the law and limits of quarantine. *New England Journal of Medicine*, *382*(15), e28. https://doi.org/ 10.1056/ NEJMp2004211
Rabardel, P., Carlin, N., & Chesnais, M. (2014). *Ergonomie : concepts et méthodes*. Octarès.
Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, *11*(1), 10-19. https://doi.org/10.1080/16864360.2013.834130
Sagnier, C. (2019). *Étude de l'acceptabilité de la réalité virtuelle dans l'industrie aéronautique*. Thèse de Doctorat, Amiens.
Sagnier, C., Loup-Escande, É., & Valléry, G. (2019). Acceptabilité de la réalité virtuelle : une revue de la littérature. *Le Travail Humain*, *82*, 183-212. https:// doi.org/10.3917/th.823.0183
Seth, A., Vance, J.M., & Oliver, J.H. (2011). Virtual reality for assembly methods prototyping: A review. *Virtual Reality*. *15*(1), 5-20. https://doi.org/10.1007/ s10055-009-0153-y.
Shi, Y., & Liu, Y. (2012). Application of DELMIA on maintainability design of aircraft. *International Conference on Computer Application and System Modeling* (pp. 771-774). https://doi.org/10.2991/iccasm.2012.195
Spieske, A., & Birkel, H. (2021). Improving supply chain resilience through industry 4.0: A systematic literature review under the impressions of the COVID-19 pandemic. *Computers & Industrial Engineering*, *158*. https://doi.org/ 10.1016/j.cie.2021.107452
Stich, J. F. (2020). A review of workplace stress in the virtual office. *Intelligent Buildings International*, 1-13. https://doi.org/10.1080/17508975.2020.1759023
Taskin, L. & Tremblay, D. (2010). Comment gérer des télétravailleurs ? *Gestion*, *35*(1), 88-96. https://doi.org/10.3917/riges.351.0088
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. In P. Béguin & A. Weill-Fassina (dir.). *La simulation en ergonomie : connaître, agir et interagir*, (pp. 113-136). Toulouse, Octarès.
Torten, R., Reaiche, C., & Caraballo, E. L. (2016). Teleworking in the new milleneum. *The Journal of Developing Areas*, *50*(5), 317-326. https://doi.org/ 10.1353/jda.2016.0060
Trout, T. T., Russell, S., Harrison, A., Dennison Jr, M., Spicer, R., Rosenberg, E. S., & Thomas, J. (2018). Collaborative mixed reality (MxR) and networked decision making. In *Next-Generation Analyst VI*, vol. 10653, pp. 186-194. SPIE Digital Library. https://doi.org/10.1117/12.2309959
Zafiharimalala, H., & Tricot, A. (2009). Vers une prise en compte de l'utilisateur dans la conception de documents en maintenance aéronautique, Université de Toulouse le Mirail.

Manuscrit reçu / *Received* : Juillet 2022/ *July 2022*
Accepté par /*Accepted by* F. Darses : Février 2023/ *February* 2023

© Presses Universitaires de France | Téléchargé le 29/06/2023 sur www.cairn.info (IP: 24.206.108.72)



Augmented and Virtual Reality Simulation in Industry

Sylvain Fleury, Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM Université

Fabien Bernard, Airbus Helicopters S.A.S. and University of Technology of Belfort-Montbéliard–University of Bourgogne Franche-Comté

Raphaël Paquin, Airbus Helicopters S.A.S.

Philippe Blanchard, Ecole Supérieure du Bois

Simon Richir, Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM Université

Simulators have been used for a long time in industry. We identify three categories of use: training, design, and testing. We underline that for these three categories of uses, the two major areas of improvement are a better use of haptic devices but also of artificial intelligence.

Virtual reality (VR) refers to the technological systems with which the user is immersed in a virtual world based on 3D objects.[1] With augmented reality (AR), one or more virtual objects are superimposed on a real environment, registered in 3D space with real-time interactions between the physical environment and virtual objects.[1] Mixed reality (MR) is based on the mapping of the user's space, positioning virtual objects in relation to the real environment and the user and offering to the user natural and immediate interactions.[2] In the present article, we use

Digital Object Identifier 10.1109/MC.2023.3283311
Date of current version: 13 November 2023

immersive technologies to refer to VR, AR, or MR.

INTRODUCTION

Simulation for industry is the subject of a relatively detailed literature (see, for example, Ören et al.[3]), while research on immersive technologies for industry seems rarer. Yet the development of immersive technologies makes it possible to simulate more situations in a satisfactory and relevant way by providing a feeling of presence to the users.[4]

Simulation in industry refers, in fact, to the three main categories of uses that have been described by Posada et al.[5]: training, designing, and testing (in virtual worlds before deploying in the real world). The aim of this article is to present these main uses of AR and VR that are developing in industry. We also want to analyze the state of research on this subject and the questions that remain unanswered but also to identify the common issues among the different use cases. The examples we have been able to identify were more often from VR than from AR, probably because AR is at a slightly lower level of technological maturity.[6]

SIMULATE FOR TRAINING

A systematic review of the literature was published in 2021[7] in regard to experiments on learning based on VR tools. Some studies show a positive effect of VR on learning (compared to other media), and some show no difference, while others, more rarely, show a negative effect. This first observation should be put into perspective with the well-known publication bias, which leads studies showing positive results to have a much greater chance of being published than those that show no significant difference among several experimental conditions. The authors of the review also take a critical look at the methodology of the studies conducted. Many of them are based on interviews in which students are asked whether they feel that VR helps them learn, which does not prove that learning was actually better. It is also noted that some studies do not have a control group but make a comparison of knowledge before learning and after learning. For example, one of the studies in the article mentions as a positive result a 14% gain on a knowledge test after learning in VR. However, 14% as a difference in knowledge on a specific subject between before and after a course (in VR or not) can also be considered a very low result. Since some studies show the positive effects of VR on learning (although some are methodologically questionable) and others show negative or neutral effects, it is necessary to understand what differentiates them to identify the situations in which this type of medium is relevant.

Immersive technologies appear to have potential whenever training requires users to feel a sense of social presence, that is, the feeling of "being there" with a "real" person.[4] This feeling is supported by stereoscopic 3D, immersion, and the consistent representation of the people we are with. When faced with VR avatars, individuals' emotional responses, particularly in terms of anxiety, are similar to those measured in real-life situations, including responses to negative audience feedback. Increasing social presence is not in itself a benefit to learning. The visual representation of the teacher can also constitute an interference, a piece of competing information that is useless to the task and therefore potentially detrimental.

VR also has the capacity to generate a feeling of physical presence. A visually realistic environment is an effective way to provide a believable virtual experience. This means that VR can also familiarize the learners with a specific workplace. For instance,



FIGURE 1. A realistic representation of an industrial workshop.

Figure 1 shows a realistic representation of an existing industrial workshop that allows learners to see the layout of the machines so that they are comfortable working in the real workshop.

Through headset and gamepad position tracking and through tracking other parts of the body when adequate devices are used, VR is a medium that can lead users to adopt postures that are more or less equivalent to those they would adopt when carrying out a similar activity in a real situation. It is therefore particularly suitable for learning technical gestures or procedures. The level of the precision of the gesture required in the activity being learned should be related to the possibilities of the technology used. For example, learning a procedure on an electrical system or even interacting with a billet in a forge (see Figure 2) can be carried out with the usual VR controllers because it is not the fine motor gesture that will be trained but rather the understanding of the actions to be carried out. On the other hand, learning the precise gesture of a surgeon, if it is possible in VR, would be carried out with an effort feedback device, such as a haptic pen, for example.

There can be several gains in terms of learning regarding the use of haptic systems, but to be widely used, it has to be realistic, usable, and affordable to open a lot of new usages of VR for learning. VR is often used to learn safety behaviors. Obviously, carrying out this learning with a digital simulator rather than in a real situation allows learners to go as far as the accident without taking any risks. VR makes it possible to experience the accident more realistically than a non-immersive device.

In cases where users have to coreference physical elements with virtual elements, AR makes this integration possible. It can be used, for example, to make explanations written on an industrial machine appear in an integrated way, with each piece of content appearing directly near the part of the machine corresponding to what this content refers to. This integration of real elements, such as a machine and pedagogical highlight or visualization, can also be reproduced in VR (see, for example, Figure 3).

Finally, many studies show that course sequences based on immersive technologies often improve course attractiveness and learner satisfaction. For example, a VR anatomy course by Stepan et al.[8] does not make any difference to the traditional course regarding anatomy knowledge, but it is considered more engaging, enjoyable, useful, and motivating for students. Immersive technologies can therefore be a way to make some learning more

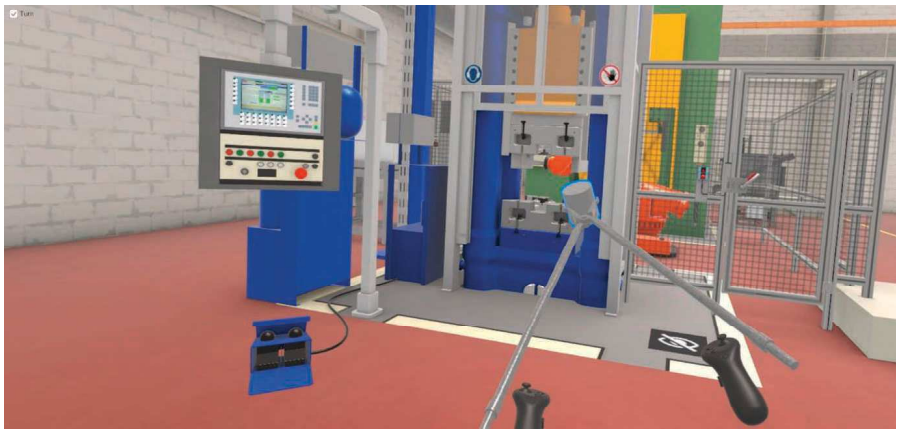


FIGURE 2. An interaction with a billet in a forge.

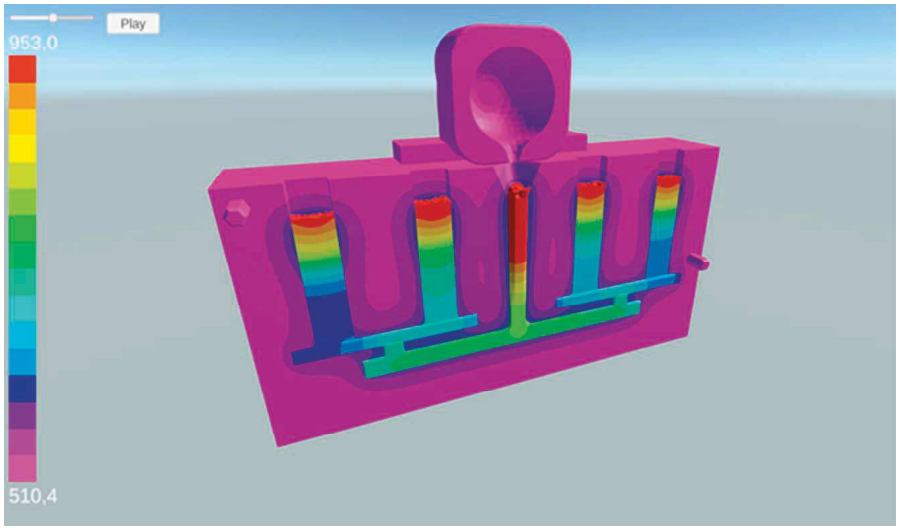


FIGURE 3. The visualization of physical phenomena.

attractive. In some cases, satisfaction and institutional image are issues for trainer. The positive effects of immersive technologies on the pleasurable and motivating nature of the activity also offer a potential that can be interesting for independent learning and revision. In cases where learners have the freedom to do exercises for practice or to not do so, having access to an attractive practice tool can make a difference to the amount of practice done.

SIMULATE FOR DESIGNING PRODUCTS

Simulators based on immersive technologies are identified to be relevant tools to support the design process for three main types of simulations: environments, intermediate objects of design, and co-designers. Immersing the designers in the right environment allows them to consider the characteristics of the place, such as its dimensions. The advantage of the modeled environment is that it can be used even if the real equivalent does not exist yet. When the environment already exists, the simpler and faster process is to acquire its volumes using 3D scanning, which captures all the details in the room that may be useful for the designers.

VR is relevant for the creation of intermediate design objects, particularly during the early stages that necessitate creativity, because it stimulates users and allows them to sketch using natural gestures that facilitate the expression of ideas. Cocreation in VR can be based on a metaphor of painting, sculpting, or 3D modeling to make the activity stimulating and easy to overcome. Figure 4 shows examples of VR sketching activity immersed in a scanned environment. The activity of sketching is in some cases part of ideation as sketching can be the means of representing the ideas generated. Sketching activity leads to generating more ideas than quick and dirty prototyping with tangible materials and leads to exploring more design spaces. VR as a tool for creativity is generally considered to be beneficial for creative activities. VR sketching software would be more effective than tablets for creative sketching as VR would support more flow and task motivation for the users.

VR is also superior to pen and paper for creative sketching because it leads to a satisfying level of efficiency, effectiveness, ease of use, and enjoyment and because it generates more extension of solution space, the enhancement of idea transformation, and inducement to a more holistic design approach for idea generation.[9] Some research has also been conducted on the uses of artificial intelligence (AI) to support the design process, for example, to automatically generate shapes to inspire designers.[10] This type of system could have great potential if integrated into a VR creative design environment.

VR is increasingly used in engineering for visualization but also for interaction with 3D models. In the study by Feeman et al.,[11] the participants had to model a chair. In one experimental condition, they used desktop CAD software, and in the other condition, they used the same software with a VR headset. The chairs modeled with desktop software were simplistic. It seems that the participants considered the task as finished as soon as the model looked like a chair. In comparison, the chairs modeled with headsets were more complex and more creative, as if the participants were more comfortable with this activity and continued longer to improve their model. Figure 5 shows three examples of furniture design made entirely in VR.

Finally, VR allows users to visualize at scale the intermediary design objects they work on to immediately identify corrections or improvements to be made. The integration of an intermediate object of design in a virtual environment of its future context is a means of identifying corrections that need to be made. It is also possible to integrate into AR a model in a real environment to visualize it and verify its adequacy. In a study by Fleury et al.,[12] students had to model furniture to refurbish a break room. The participants modeled the first version of their furniture using desktop 3D software. Then,



(a) (b)

FIGURE 4. (a) A seated user sketching a 3D table in VR, immersed in a 3D scanned virtual environment. (b) A quick and dirty immersed sketch of furniture in a scanned kitchen (on the right).



(a) (b) (c)

FIGURE 5. (a)–(c) Some examples of furniture models generated directly in VR.

they visualized their furniture in VR, immersed in a model of the room, with the possibility to position themselves in a specific posture to test the layout (see Figure 6). This study revealed that the participants were satisfied with their production before the VR step, but they all immediately identified several problems to be corrected (inadequacy between the furniture and the environment) when they were immersed. It is also possible for the designer or the future user to test the physical contact with a future product, for instance, the texture of a seat or a car's dashboard, using intermittent haptic interfaces based on a robotic arm (for example, Mugisha et al.[13])

SIMULATE FOR TESTING A PROCESS

This kind of simulation allows an engineer to have an overview of a process or an organization. This category does not impact only a product, as mentioned in the previous section, but how this product can be used and manipulated in a specific context. The notion of simulation has been addressed several times in the literature, often following needs arising from practical cases in the aeronautical, nuclear, or automotive industries. Simulation for testing a process has a double challenge: anticipating future activity in the design phase and training/educating the operator for a new workstation. In both cases, the simulation must bring sufficient knowledge to the designer and/or the operator so that they appropriate the future environment to discern all the subtleties of the potential interaction among humans, the system, the position, the tool, and the environment. The designers will then have the possibility of "designing": modifying their architectures to adapt them to the characteristics and expectations of people. As for the operators, they will be able to know the strategies to adopt and the essential knowledge to memorize and train their reflexes to carry out their activities as well as possible in safety.

Beyond training, simulation also makes it possible to anticipate "human errors," particularly in the nuclear sector or even aeronautics. Indeed, we propose to use digital simulation tools such as VR to study, understand, and anticipate the behavior of users. By implementing numerous simulations testing users under different conditions, it becomes possible to observe recurring errors that can be corrected by improving the systems or the physical environment or even by better training users. The simulation is distinguished by three objectives, which were defined by Béguin and Weill-Fassina[14] and which we detail here in the context of analysis carried out in the design office.

- knowing a work situation whose real observation is impossible
- acting as early as possible in the design process so that modifications are made
- interacting around the social concept means; that is, each professional actor in the design office



(a) (b)

FIGURE 6. (a) and (b) A user testing the view of a 3D modeled environment, reproducing a realistic position using a simple tangible chair.

working on a system must know and understand the simulated situations and their conclusions for the purposes of homogeneity of the final technical data.

These three objectives are part of a more global approach in which simulation is the pivot. Figure 7 shows the formalization of the approach to conducting a simulation project in ergonomics. Before any simulation, it is first necessary to analyze the current context and, of course, the future context in which the product or system under development will be used. It is then necessary (to prepare the simulation) to carry out a study by analogy to similar or even existing systems. There are often work and usage contexts that are close to the situation that needs to be simulated. It is therefore essential to carry out a prospective analysis of existing processes to foresee the possible similarities with the future process or procedures in the work environment in design. This preparation also aims to ensure a strong ecological validity of the future simulation and, hence, to ensure the smallest difference between what is simulated and what will happen in a real situation.

In the second step, it is necessary to design around the simulation. Thus, in this phase, the future process has to be simulated considering the characteristics of the future user. The last step, "to formalize," is perhaps one of the most important in a design office. Indeed, most of the population composing a design office and testing a process is specialized in mechanical engineering, not in human factors. These stakeholders lack knowledge of the human factors, and this formalization stage aims above all to communicate with all the departments of the design office working on the studied and simulated system. A good formalization of the simulation and the associated conclusions leads to recommendations that will have to be challenged against the mechanical criteria.

Many industries now develop and use digital simulation tools like VR and AR to assess a process. We can take some examples from the aviation industry, which has developed many uses of digital simulation tools over the last 20 years. More particularly, in maintainability, a department of the design office, which anticipates the future maintenance of aircraft, is currently in development. This department must anticipate human errors during the maintenance activity and make relevant recommendations to all design stakeholders to improve the global aircraft design, maintenance tools, and procedures. During the maintenance, there are multiple physical contacts that are important to simulate through

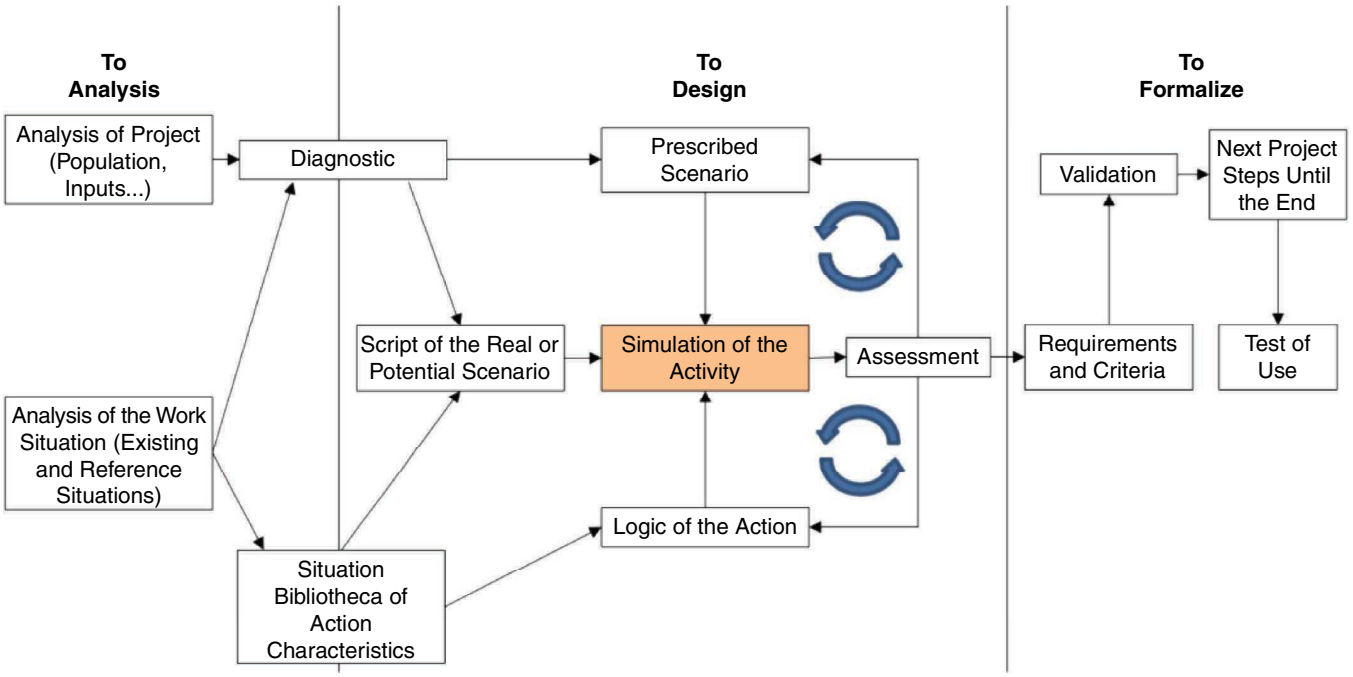


FIGURE 7. The human factors approach during a simulation process. (Source: Based on Van Belleghem and Guerry.[15])

VR. Indeed, the human factors analysis must take into consideration the three dimensions as physical, organization, and cognitive. The engine maintenance through the VR based on physical-sensory feedback has been tested.

The haptic system studied proved to be effective on the entire workstation represented by the engine. Indeed, this system follows the operators in their movements and has made it possible to ensure the diagnosis of different postures. This system, dedicated to a specific engine, has therefore made it possible to study certain criteria of the physical component of the ergonomics of the simulated tasks. Haptic systems are a real development issue and should lead to an optimal evaluation since they go beyond visual and sound immersion. Figure 8 shows a haptic system used during VR simulation, essential to assess human factors dimensions.

However, the cost of development and operation remains high, while many work situations cannot be studied. Indeed, the device remains bulky and complex in its implementation, not allowing adaptability to all work situations. In the context of aviation maintenance, many situations occur in a very constrained environment due to the very architecture of the aircraft. The haptic system is still not the most adequate tool, and other alternatives exist, sometimes simpler and cheaper.

More recently, in the context of a European helicopter manufacturer, a study has been performed to better know the complementarity among existing simulation tools in the maintainability department.[16] The use of VR to assess the three dimensions of human factors has highlighted the need to add some physical part to the environment. The need for motion in the work environment does not allow haptic system integration. However, a modular tangible interface system has been developed to provide adjustable rest and force feedback to various work situations in VR to ensure the consistency and representativeness of the simulation without the need to build a complete wood mockup. Before each VR simulation, an assessment of the tangible interface or force feedback is done to prepare the required material that could need 3D printing. The addition of the physical elements as well as their synchronization between the real and virtual world is less expensive than the haptic system, and it appears to be efficient at assessing human factors criteria.

The maintainability department of this industry is equipped with 3D printers to provide fast solutions for real part dimensions that can be easily merged into the VR simulation thanks to the motion tracker installed on the parts. To ensure representativeness, weight can be added to the 3D-printed parts, and a connection with the tangible interface can be made to reproduce, for example, a torque check. Such a protocol can be set up in a couple of days, whereas building a fully representative mockup would take weeks. Figures 9 and 10 show an example of

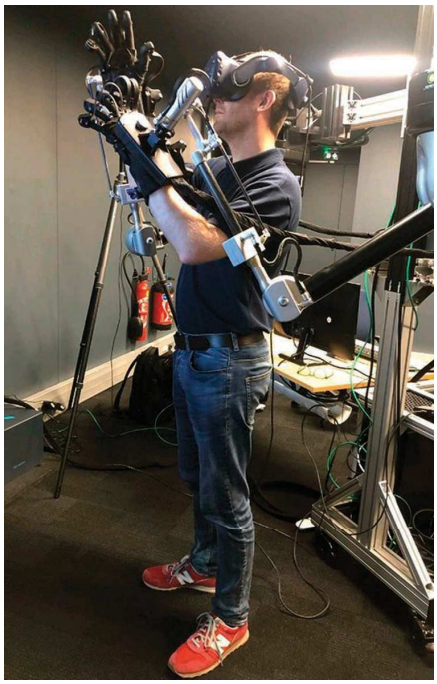
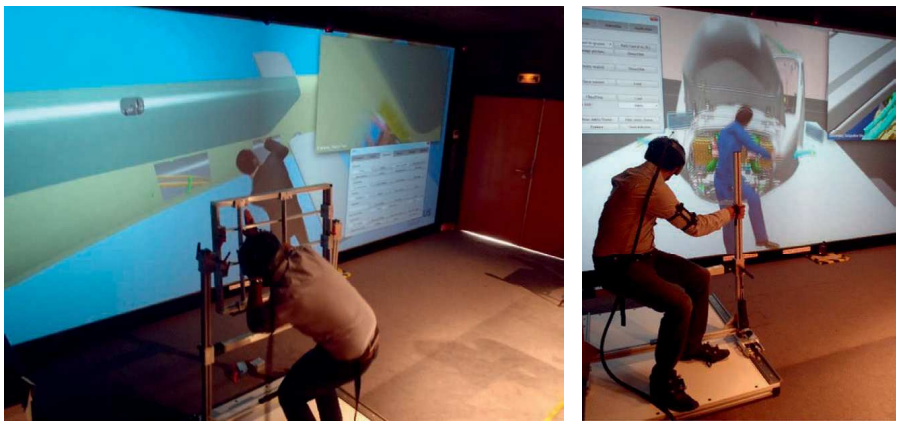


FIGURE 8. A haptic system used during a VR simulation.



(a) (b)

FIGURE 9. (a) and (b) A 2015 simulation in VR during the predesign phase of H160 to assess the ergonomic criteria for maintenance tasks such as the replacement of the flight control actuator inside the tail boom through a hatch or cleaning of the air conditioning filter in the nose avionic bay.

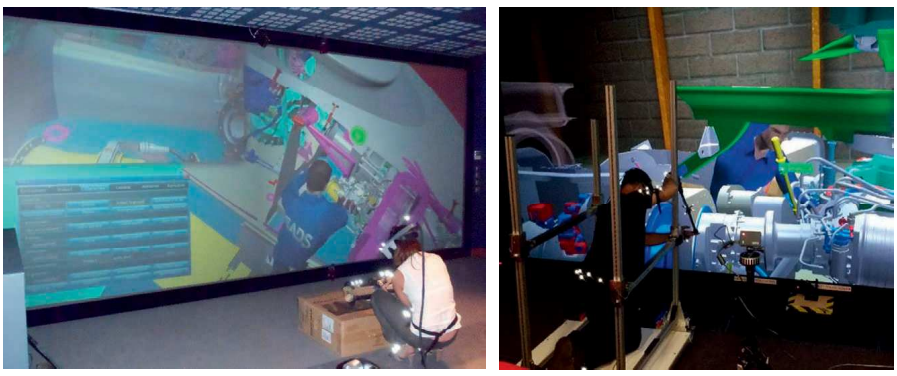
the digital system deployed for the last 10 years.

However, VR is not adapted to virtually perform all kinds of maintenance tasks. To compensate, AR is also developed and used. For example, AR has been used to specify, during the design process, the location and sizing of the handles and footstep on the helicopter fuselage.[17] Thanks to a simplified wood mockup, these authors have assessed the value of the AR to complete the simulation with all the details of the digital mockup. Two AR devices used allow a collaborative session among operators, human factors specialists, and designers, allowing them to validate the design and to identify potential risk and mitigation with higher accuracy, reducing lead time and cost with better confidence with each stakeholder.

ADDING AI TO IMMERSIVE SIMULATORS IS LIKELY TO SIGNIFICANTLY IMPROVE THEIR EFFECTIVENESS.

AR and VR allow one to visualize and interact with information or things in an immersive way, providing a feeling of presence to the users. This allows one to test situations in virtual worlds rather than in the tangible world, which has several virtues.

- save time and resources by testing something before deploying it
- improve safety by exposing the users only to virtual dangers
- allow an optimized information presentation format to guide attention and facilitate understanding.



(a) (b)

FIGURE 10. (a) and (b) 2011 and 2017 simulations in VR during the predesign phase of H160 to assess force feedback and operator loads for the engine transmission shaft or torque check of the transmission system.

The motivation for the present article was to describe and discuss the main uses of immersive technologies that are developing in industry. The aim was to analyze the state of research on this subject and the main issues that need to be addressed for future research.

We distinguished three main fields of use: training, designing products, and testing a process. Immersive technologies are used when people need to interact in a natural way (gesturally or posturally) with something that does not yet exist (a digital representation of a product being designed) or to interact with devices that are expensive (resources are saved by using the simulator rather than the real device) or dangerous (it is possible to go as far as an accident without danger). They are also used when it is necessary to visualize things as if you were facing them: to learn about them, test them, or consider them for reflection.

Among the avenues for the development of immersive simulators for industry, haptics seems particularly promising. *Haptics* refers to the notion of both force feedback and tactile perception. Realistic force feedback makes some training use cases possible when this feedback is necessary information to adjust a gesture, mainly for motor training. This can be useful for a lot of training, for instance, in the medical field (for example, surgery and dentistry) or for musical instruments. Tactile perception can be useful when texture must be simulated (for example, to test the interior of a car prototype[13]) Today, the use of haptic devices is limited because the equipment is relatively expensive and complex to implement. In addition, this involves specific

software developments to manage the haptic aspects in an immersive application. We believe there is a strong case for developing research to make haptic devices simpler and more accessible to develop new uses.

The collaborative dimension also appears as an important element in the three categories of uses mentioned in this article. Learning situations in immersive environments are almost always considered in research as individual situations with a user learning content by using an application. However, real training situations, whether vocational or educational, are usually collective. They bring together several learners, but they also involve the presence of a teacher or trainer. Similarly, immersive tools used in product or process design research are mostly individual and focused either on the designer (as in VR drawing tools) or on the tester (as in maintenance simulations). Nevertheless, the design process is often collective, involving several professionals (designers, engineers, etc.) and future potential users as testers. This is the second area of research that we feel is insufficiently developed today. There is a need for work that considers the role of teachers in immersive training and the specific interfaces that they could use to monitor and run training courses. There is also a need for research based on collaborative tools for product and process design, reflecting the collective aspect of design and the variety of roles of the stakeholders.

Adding AI to immersive simulators is likely to significantly improve their effectiveness. It can be used to analyze gestures to "guess the user's intentions" and propose corrections (for example, see Xu et al.[18]) or to evaluate production and provide detailed feedback based on model gestures, as it is used in training with other technologies (for example, see Bonneton-Botté et al.[19]) Another use of AI for immersive applications is to take over some of the work that needs to be done, for example, generative design, which automatically generates content based on specific constraints.[20] Clearly, AI is likely to become increasingly important in digital applications. This raises many new research topics that need to be addressed. Task sharing between AI and users needs to be done in a meaningful way, but more importantly, the issue of AI representation in immersive environments needs to be explored and characterized. Depending on the type of task being performed, it is necessary to know how the AI should be represented in the environment to facilitate interaction, trust, and the efficiency of the activity. For example, in VR or AR, one could imagine representing the AI by a character, humanoid or not, or evaluating innovative modes of dynamic data visualization in immersion. C

REFERENCES

1. R. T. Azuma, "A survey of augmented reality," *Presence, Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 6, no. 4, pp. 355–385, Aug. 1997, doi: 10.1162/pres.1997.6.4.355.
2. M. Parveau and M. Adda, "Toward a user-centric classification scheme for extended reality paradigms," *J. Ambient Intell. Humanized Comput.*, vol. 11, no. 6, pp. 2237–2249, Jun. 2020, doi: 10.1007/s12652-019-01352-9.
3. T. Ören, B. P. Zeigler, and A. Tolk, *Body of Knowledge for Modeling and Simulation: A Handbook by the Society for Modeling and Simulation International*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2023.
4. C. S. Oh, J. N. Bailenson, and G. F. Welch, "A systematic review of social presence: Definition, antecedents, and implications," *Frontiers Robot. AI*, vol. 5, Oct. 2018, Art. no. 114, doi: 10.3389/frobt.2018.00114.
5. J. Posada et al., "Computer graphics and visual computing use cases for industry 4.0 and operator 4.0," *Int. J. Simul. Multidisciplinary Des. Optim. Int.J.*, vol. 12, Oct. 2021, Art. no. 29, doi: 10.1051/smdo/2021026.
6. O. Danielsson, M. Holm, and A. Syberfeldt, "Augmented reality smart glasses in industrial assembly: Current status and future challenges," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 20, Dec. 2020, Art. no. 100175, doi: 10.1016/j.jii.2020.100175.
7. D. Hamilton, J. McKechnie, E. Edgerton, and C. Wilson, "Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: A systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design," *J. Comput. Educ.*, vol. 8, no. 1, pp. 1–32, Mar. 2021, doi: 10.1007/s40692-020-00169-2.
8. K. Stepan et al., "Immersive virtual reality as a teaching tool for neuroanatomy," *Int. Forum Allergy Rhinol.*, vol. 7, no. 10, pp. 1006–1013, Oct. 2017, doi: 10.1002/alr.21986.
9. E. K. Yang and J. H. Lee, "Cognitive impact of virtual reality sketching on designers' concept generation," *Digit. Creativity*, vol. 31, no. 2, pp. 82–97, Apr. 2020, doi: 10.1080/14626268.2020.1726964.
10. C. González-Val and S. Muiños-Landin. *Generative Design for Social Manufacturing*. (Adgn@ Ecai2020). Zenodo. [Online]. Available: https://zenodo.org/record/4597558
11. S. M. Feeman, L. B. Wright, and J. L. Salmon, "Exploration and evaluation of CAD modeling in virtual reality," *Comput.-Aided Des. Appl.*, vol. 15, no. 6, pp. 892–904, Nov. 2018, doi: 10.1080/16864360.2018.1462570.
12. S. Fleury, B. Poussard, P. Blanchard, L. Dupont, P. Meister Broekema, and S. Richir, "Innovative process for furniture design: Contribution of 3D scan and virtual reality,"

ABOUT THE AUTHORS

SYLVAIN FLEURY is a research engineer at the Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM Université, F-53810 Change, France. His research interests include the uses of virtual reality for product design and learning. Fleury received a Ph.D. in cognitive ergonomics from the University of Rennes 2. Contact him at sylvain.fleury@ensam.eu.

FABIEN BERNARD is a doctor in human factors engineering at Airbus Helicopters S.A.S., 13725 Marignane Cedex, France, and the University of Technology of Belfort-Montbéliard–University of Bourgogne Franche-Comté, 90010 Belfort, France. His research interests include the integration of human factors/ergonomics in multidisciplinary collaborative environments, including the support of simulation digital tools. Bernard received a Ph.D in human factors from the University of Bourgogne Franche-Comté. Contact him at fabien.bernard@airbus.com.

RAPHAEL PAQUIN is a maintainability and human factors in maintenance expert at Airbus Helicopters S.A.S., 13725 Marignane Cedex, France. He has contributed since 2010 to the deployment of virtual reality for maintainability and human factors analysis for all new development within Airbus Helicopters. Contact him at raphael.paquin@airbus.com.

PHILIPPE BLANCHARD is a research engineer at the LIMBHA Lab, Ecole Supérieure du Bois, F-44306 Nantes, France. His research interests include the uses of design and innovation in a small and medium enterprise context. Blanchard received a master's degree in engineering from the Conservatoire National des Arts et Métiers. Contact him at philippe.blanchard@esb-campus.fr.

SIMON RICHIR is a professor at the Arts et Metiers Institute of Technology, LAMPA, HESAM Université, F-53810 Change, France, and the coeditor in chief of the *International Journal of Virtual Reality*. His research interests include the uses of virtual and augmented reality for product design, management training, and ideation. Richir received a Ph.D. in design science from the Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Contact him at simon.richir@ensam.eu.

Comput.-Aided Des. Appl., vol. 19, no. 5, pp. 868–878, Jan. 2022, doi: 10.14733/cadaps.2022.868-878.

13. S. Mugisha, M. Zoppi, R. Molfino, V. Guda, C. Chevallereau, and D. Chablat, "Safe collaboration between human and robot in a context of intermittent haptique interface," in *Proc. Int. Des. Eng. Tech. Conf. Comput. Inf. Eng. Conf.*, New York City, NY, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2021, vol. 85451, p. 1–12, doi: 10.1115/DETC2021-71518.
14. P. Béguin and A. Weill-Fassina, "De la simulation des situations de travail a la situation de simulation," in *La Simulation en Ergonomie: Connaître, Agir et Interagir*. Toulouse, France: Octares Editions, 1997, pp. 5–28.
15. L. Van Belleghem and M. H. Guerry, "De la simulation organisationnelle à la simulation manageriale," in *Proc. 51ème Congr. Int. Soc. d'Ergonom. Lang. Française*, 2016, pp. 21–23.
16. F. Bernard, M. Zare, J. C. Sagot, and R. Paquin, "Using digital and physical simulation to focus on human factors and ergonomics in aviation maintainability," *Hum. Factors*, vol. 62, no. 1, pp. 37–54, Feb. 2020, doi: 10.1177/0018720819861496.
17. R. Paquin and F. Bernard, "Use of augmented reality for hybrid mock-up validation in aviation maintainability," presented at 48th Eur. Rotorcraft Forum, Zurich, Switzerland, 2022.
18. R. Xu, Z. Han, L. Hui, J. Qian, and J. Xie, "Domain disentangled generative adversarial network for zero-shot sketch-based 3D shape retrieval," in *Proc. 36th AAAI Conf. Artif. Intell.*, 2022, pp. 2902–2910, doi: 10.1609/aaai.v36i3.20195.
19. N. Bonneton-Botté et al., "Can tablet apps support the learning of handwriting? An investigation of learning outcomes in kindergarten classroom," *Comput. Educ.*, vol. 151, Jul. 2020, Art. no. 103831, doi: 10.1016/j.compedu.2020.103831.
20. J. Urban Davis, F. Anderson, M. Stroetzel, T. Grossman, and G. Fitzmaurice, "Designing co-creative AI for virtual environments," in *Proc. Creativity Cognition*, 2021, pp. 1–11, doi: 10.1145/3450741.3465260.

View publication stats