

PRISE EN COMPTE DU FACTEUR HUMAIN EN MAINTENABILITE : CAS D'UN HELICOPTERISTE

Fabien BERNARD¹², Florence BAZZARO¹ ; Raphael PAQUIN² ; Jean-Claude SAGOT¹

¹Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société (IRTES) - Equipe de recherche en ERgonomie et COncption des Systèmes (ERCOS) - Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) - Université Bourgogne Franche Comté (UBFC) Belfort, France.

²Airbus Helicopters.

¹ florence.bazzaro@utbm.fr; jean-claude.sagot@utbm.fr

² fabien.bernard@airbus.com; raphael.paquin@airbus.com

Résumé : la maintenabilité est aujourd'hui une spécialité très importante dans le monde de la conception. Elle vise à anticiper les futures tâches de maintenance qui seront réalisées par des utilisateurs et des opérateurs spécialisés. Cette dimension humaine doit donc être prise en compte très tôt, dès la phase de conception préliminaire. Nous verrons dans cet article les pratiques d'un service de maintenabilité au sein d'un hélicoptériste en termes de prise en compte du facteur humain lors des études de maintenabilité. Pour ce faire, nous rappellerons le contexte particulier de la maintenance aéronautique, les enjeux de l'ergonomie ainsi que les outils de simulation utilisés en maintenabilité avant de réaliser une observation industrielle.

Mots-clés : maintenabilité, ergonomie, conception mécanique, simulation numérique, aéronautique

1 INTRODUCTION

Le domaine de l'aéronautique et plus particulièrement celui des hélicoptéristes est confronté à des challenges techniques, technologiques permanents, nécessitant de combiner contraintes de conception, de production, de qualité, de coûts et de maintenance. L'un des défis majeurs de l'aéronautique est la maintenabilité des aéronefs et notamment la prise en compte du facteur humain à des fins de sécurité, de santé et d'efficacité. Dans la communauté scientifique, deux courants principaux s'intéressent à cette problématique. Ainsi certains auteurs se focalisent sur l'étude des erreurs humaines en maintenabilité [1], d'autres s'interrogent plus spécifiquement sur les conditions de travail des opérateurs de maintenance [2], et les enjeux en termes de santé des opérateurs. Les travaux qui se sont intéressés à cette seconde dimension reposent sur l'utilisation de méthodes et d'outils relevant en particulier de l'ergonomie, à travers une approche essentiellement normative [1]. Ces travaux proposent notamment l'utilisation d'outils de simulation numériques ou physiques permettant d'évaluer, au regard de ces normes, l'activité des opérateurs de maintenance [3]. Cependant peu de travaux du domaine, hormis ceux relatifs à l'erreur humaine, se sont interrogés sur les spécificités physiques, cognitives, organisationnelles liées à la réalisation de l'activité des opérateurs de maintenance alors que cette dernière est définie comme étant longue, complexe [2], pouvant même avoir des effets sur la santé des personnes (troubles musculo-squelettiques, accidents du travail, stress au travail) [4].

Ainsi, pour répondre à cette lacune, nos travaux de recherche s'intéressent à comment mieux prendre en compte le facteur humain en maintenabilité dans les dimensions évoquées, en s'appuyant sur

les outils de simulation actuellement utilisées. A ces fins-là, il nous semble indispensable d'étudier dans un premier temps les pratiques existantes chez les industriels tous secteurs d'activités confondues. Ainsi, dans le cadre de cette communication, nous nous interrogeons sur les pratiques d'un service de maintenabilité au sein d'un hélicoptériste en termes de prise en compte du facteur humain lors des études de maintenabilité.

Dans un premier temps, nous présentons le contexte général de nos travaux : la maintenabilité, l'ergonomie et les outils de simulation, puis nous présenterons notre étude des pratiques au sein d'un hélicoptériste. Le résultat de cette étude permettra, au regard de la littérature du domaine, de discuter des limites des outils et des méthodes associées pour intégrer l'ergonomie en maintenabilité.

2 CONTEXTE GENERAL

L'objectif de cette partie est d'expliquer le contexte et les enjeux actuels de la maintenance aéronautique et de positionner l'ergonomie au sein de ce secteur d'activité. Un focus particulier sera porté sur les indicateurs de maintenabilité et les outils de simulation.

2.1 La maintenabilité aéronautique

Le domaine de la maintenabilité existe depuis plusieurs décennies au sein des industries aéronautiques [5]. Il apparaît comme un point central du processus d'innovation pour la conception des nouveaux avions, élément clé de la compétitivité [6]. Or les coûts liés à la maintenance restent très importants, variant de 12% à 15% des dépenses totales d'une compagnie aérienne [7]. Ces coûts résultent notamment de l'activité de maintenance qui est toujours très longue et complexe [2][8]. Cette activité est identifiée comme pénible par 62% des opérateurs [4]. En effet, l'opérateur, pour mener à bien sa mission, adopte des gestes, des postures pénibles, voire dangereuses, associées à des efforts souvent importants [9]. De plus, l'activité de maintenance est une succession de tâches, voire de sous tâches qui requière une forte concentration et engendre donc une charge mentale importante [10]. Cette pénibilité entraîne notamment un taux d'accident du travail important, ainsi l'AFIM [4] précise que ces derniers dans le secteur de la maintenance sont 30% plus élevés que la moyenne nationale. La sauvegarde de la santé et l'amélioration de la sécurité des opérateurs de maintenance, restent ainsi un enjeu majeur des études en maintenabilité. Ces questionnements sont d'autant plus pertinents en aéronautique où la réglementation impose des rythmes de maintenance régulier, 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 America) définissent les standards à respecter pour la maintenance et l'entretien des avions dans le but d'accroître leur disponibilité tout en optimisant la fiabilité, les coûts et la maintenabilité [11][12].

Les études en maintenabilité reposent notamment sur l'utilisation d'indicateurs. En effet, selon la norme européenne EN 13303 :2010 « maintenance et terminologie de la maintenance » [13], la maintenabilité définit la « capacité d'un produit à être maintenu ou réparé facilement lors des opérations de maintenance pour qu'il retrouve les fonctions pour lequel il a été conçu ». Cette norme précise également que la maintenabilité « peut-être quantifiée à travers des mesures appropriées ou des indicateurs » par les ingénieurs-concepteurs experts en maintenabilité. Ainsi, les indicateurs en maintenabilité sont classés en trois catégories (techniques, économiques et organisationnelles) et doivent, par définition, permettre d'observer sur une période donnée les évolutions d'un phénomène préalablement choisi [14][15].

La littérature est assez riche sur le sujet puisque nous recensons trente-quatre indicateurs pour évaluer la maintenabilité répartie dans les trois catégories techniques, économiques et organisationnelles. Par exemple, dans la catégorie technique nous avons l'accessibilité physique ou visuelle [14], dans la catégorie économique nous avons les coûts de maintenances [14] et enfin, dans la catégorie organisationnelle, nous pouvons citer le niveau d'entraînement [14].

2.2 L'ergonomie en maintenabilité

Les problématiques soulevées par l'évaluation des indicateurs de maintenabilité, telles que l'accessibilité physique ou visuelle, touchent l'Homme et son activité de travail. Pour y répondre, l'intégration du facteur humain semble être une solution, notamment à travers l'ergonomie [16]. L'Association Internationale d'Ergonomie (IEA, 2000) définit l'ergonomie comme « la discipline scientifique qui vise à la compréhension des interactions entre les humains et les composantes d'un système, c'est la profession qui applique principes théoriques, données et méthodes en vue d'optimiser le bien-être des personnes et la performance globale des systèmes. » Pour l'IEA « les ergonomes contribuent à la conception et l'évaluation des tâches, du travail, des produits, des environnements et des systèmes en vue de les harmoniser avec les besoins, les capacités et les limites des personnes ». L'IAE définit trois domaines de spécialisation de l'ergonomie, qu'il convient d'explorer dans toutes études ergonomiques : l'ergonomie physique, cognitive et organisationnelle. Cette approche reposant sur l'analyse de l'activité, dans sa définition, semble répondre à notre problématique, s'intéressant notamment à pénibilité au travail qui suggère que l'activité de maintenance est physiquement pénible avec une charge cognitive parfois élevée, associée à une organisation complexe et imprévisible. De nombreux auteurs, spécialistes du facteur humain, [17][18][19] ont montré la pertinence des outils de simulation pour favoriser la prise en compte de l'ergonomie lors de la conception de situations de travail. Nous nous intéressons ainsi à l'utilisation des outils de simulation dans le domaine de la maintenabilité.

2.4 Outils de simulation et prise en compte du facteur humain

Aujourd'hui, et dans la majorité des bureaux d'étude, les ingénieurs-concepteurs conçoivent des systèmes/produits en se fiant souvent à leur propre intuition et expérience [20]. Pour y parvenir, ils utilisent leurs outils classiques de simulation numérique tel que les modeleurs, qui peuvent, dans une certaine mesure, les aider à conduire des analyses et des évaluations ergonomiques liés à l'aspect physique de l'environnement [15][21]. En effet, les ingénieurs vont prendre des dimensions ou regarder les collisions potentielles entre les pièces et les outillages pour se rendre compte de la faisabilité d'une tâche. De plus, certains modeleurs peuvent être couplés à des outils de simulation numérique spécifiques dédiés à l'évaluation du facteur humain, toujours pour évaluer l'ergonomie physique. Nous pouvons, par exemple, citer les simulations par mannequins numériques qui permettent d'intégrer des notions normatives (postures, anthropométrie, contraintes biomécaniques...) dans les phases amont du processus de conception [22][23]. En maintenabilité, de nombreux travaux proposent d'utiliser le mannequin numérique pour évaluer les indicateurs de maintenabilité, voir pour définir les exigences ergonomiques. Par exemple, Regazzoni et Rizzi, 2014, se sont concentrés sur le champ de vision et les zones d'atteinte pour réaliser une action de maintenance.

Cet outil, bien que puissant, présente des limites. En effet, l'expertise ergonomique liée à l'analyse de l'activité de maintenance proprement dite, intégrant les savoirs et les savoir-faire des opérateurs techniciens est souvent, pour ne pas dire pas, considérée au départ en accord avec les travaux de Leonard [6]. Ainsi les ingénieurs concepteur de produits définissent des scénarii d'activité de maintenance pour les mannequins numériques qu'ils utilisent en décalage souvent avec la réalité du métier [24]. Les exigences ergonomiques qui peuvent être extraites de ces simulations, sont d'une part orientées vers

l'ergonomie physique et d'autre part rarement interprétées, voire validées par des experts métiers en facteur humain [20] et en maintenabilité. Dès lors, comme déjà évoqué, une seule composante de l'ergonomie est étudiée contrairement aux prérequis souhaitées. Ainsi, cette démarche, en maintenabilité, met de côté l'analyse de l'activité de travail des opérateurs-techniciens, n'intégrant donc pas les dimensions cognitives et organisationnelles de l'ergonomie comme définies par l'IEA (2000).

Les outils de réalité virtuelle sont alors souvent utilisés par les ingénieurs-concepteurs pour tenter de répondre aux limites évoquées, car, en effet, ces outils permettent aux concepteurs, à l'utilisateur final, voire à l'ergonome d'élaborer et de simuler certaines conditions d'exercices des activités futures souhaitables, en accord avec les travaux de Sagot et al. [25], d'une opération de maintenance en fonction des contraintes environnementales, organisationnelles etc. [26]. De nombreux travaux dans le domaine de la conception, proposent d'utiliser la réalité virtuelle couplée à des outils d'évaluation des postures, du port de charge etc [27] [28]. A titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de Jayaram [28] qui propose une méthode d'évaluation des postures donnant un score global à partir de la position des membres de l'opérateur réel lors d'une activité d'assemblage.

De plus, il est intéressant de remarquer, que les outils de simulation physique, maquette à échelle 1, prototype d'hélicoptère, sont peu utilisés, et rarement seuls. Ainsi, nous retiendrons les travaux de Regazzoni et Rizzi, qui proposent d'utiliser conjointement les outils de simulation numérique lors des phases amont du projet et les outils de simulation physique lors des phases aval [3]. Ces travaux sont en cohérence avec ceux de Chitescu et al. [26], qui cherchent à intégrer l'ergonomie dans la conception de produit à travers l'utilisation séquentielle des outils de simulation numérique puis des outils de simulation physique.

L'état de l'art met clairement en évidence la nécessité de la prise en compte de l'ergonomie dans toutes ses composantes dans les études de maintenabilité, il souligne également la pertinence de l'utilisation des outils de simulation pour évaluer l'activité future souhaitable [25] mais insiste sur les limites dans l'utilisation de ces outils dans le domaine de la maintenabilité. Pour affiner notre réflexion, nous proposons d'observer les pratiques, pour soutenir la prise en compte du facteur humain, dans un service de maintenabilité au sein d'un hélicoptériste.

3 ETUDE INDUSTRIEL CHEZ UN HELICOPTERISTE

Il s'agira, dans un premier temps, de décrire notre méthode d'analyse puis d'expliquer les données que nous avons extraites pour conduire notre analyse.

3.1 Méthode d'analyse

A travers divers projets techniques en maintenabilité, sur deux gammes d'hélicoptères différentes, une qualification et une quantification des indicateurs techniques utilisés liés à des exigences ergonomiques ont pu être réalisées. Dans notre analyse, nous nous sommes intéressés à l'utilisation des outils utilisés par les ingénieurs-concepteurs pour évaluer l'ergonomie dans les tâches de maintenance. Cinq outils ont été recensés : le modèleur numérique, le mannequin numérique, la réalité virtuelle, des maquettes physiques et les hélicoptères eux-mêmes. Cette étude exploratoire a été conduite grâce à la mise en place d'outils de suivi de projets, l'analyse de documents techniques caractérisant les exigences de maintenabilité pour chaque appareil.

Nous nous sommes focalisés sur deux hélicoptères différents sur lesquels nous avons observé les huit mêmes zones qui impliquent des tâches de maintenance (moteur, soute, rotor arrière, poutre de queue ou encore radôme). Se sont ainsi 16 zones qui ont été observées.



Figure 1 : Exemple de parties techniques de l'hélicoptère H135 de Airbus Helicopters

Des données techniques apparaissent dans les documents de chaque zone et font notamment ressortir l'étude d'indicateurs. Ces zones ont été choisies pour deux raisons :

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

3.2 Résultats

A travers les documents techniques, nous n'observons pas de différence entre les deux hélicoptères étudiés quant à l'utilisation d'indicateurs techniques. En effet, nous observons l'utilisation systématique des 4 indicateurs suivant : accessibilité, désassemblage, interchangeabilité et tribologie (frottement/contact entre les pièces et outils). Seule l'accessibilité est utilisée de façon presque systématique par les équipes de concepteurs quel que soit le contexte de l'étude et de l'environnement associé. Nous avons alors identifié quels outils de simulation numérique étaient utilisés pour chacun de ces indicateurs. Comme l'indique le tableau 1, le modeler est l'outil le plus utilisé. Le mannequin numérique et la réalité virtuelle sont utilisés uniquement pour étudier l'indicateur accessibilité. La maquette et l'hélicoptère arrive tardivement dans le processus de conception mais des analyses d'évaluation ergonomique sont réalisées.

Groupe	Hélicoptères observés	Indicateurs de maintenabilité	Outils de simulation				
			Modeleur	Mannequin numérique	Réalité virtuelle	Maquette	Hélicoptère
Technique	2 différents	▶ Accessibilité	✓	✓	✓	✓	✓
		▶ Désassemblage	✓				✓
		▶ Interchangeabilité					✓
		▶ Tribologie (interaction des interfaces)	✓			✓	✓

Tableau 1 : outils de simulation et indicateurs chez un hélicoptériste

	Approche ergonomique en maintenabilité				
	Modeleur	Mannequin	RV	Maquette	Hélicoptère
RULA		✓	✓		
Check-list spécifique	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 2 : Outils d'évaluation ergonomique utilisés à travers les outils de simulation chez l'industriel

Pour affiner notre étude, avec l'aide des documents techniques et des échanges avec les ingénieurs-concepteurs, nous avons identifié les outils d'évaluation ergonomique utilisés pour chaque zone étudiée en fonction des outils de simulation. Comme l'indique le tableau 2, il apparaît que seulement deux outils sont utilisés : RULA [28] et une check-list spécifique construite pour le projet, comme cela est proposé par d'autres entreprises [9]. Cette check-list se focalise essentiellement sur les collisions ou encore le champ de vision lors d'une action de maintenance. Une analyse plus détaillée des documents met notamment en évidence que le champ de vision est étudié, grâce au mannequin numérique, mais en aucun cas il est défini comme un indicateur à part entière dans les documents techniques. Le champ de vision s'inscrit, en fait, dans une analyse plus globale qui prend en compte plusieurs indicateurs comme l'accessibilité physique. L'analyse finale fait ressortir uniquement quatre indicateurs quantifiés précisément. Cependant, ces résultats doivent être nuancés, en effet l'étude de maintenabilité a porté sur d'autres dimensions, mais qui n'ont pas été relevés et qualifiés de manière objective. Ainsi de nombreuses analyses, réflexions sont menées par les ingénieurs-concepteurs au regard de leur expertise mais ne reposent pas sur une quantification précise et/ou sur l'utilisation d'indicateurs.

Il est également intéressant de noter la présence, dans les documents techniques, d'un indicateur de temps pour la réalisation de la tâche. Ce temps est estimé en questionnant les opérateurs. Ce sont eux qui donnent une estimation et non l'ingénieur par l'intermédiaire d'une analyse spécifique, qu'elles soient réalisées par l'intermédiaire d'un outil numérique ou d'un essai sur une maquette voire un hélicoptère.

4 DISCUSSION

Nous avons établi la nécessité d'intégrer le facteur humain en maintenabilité pour gagner en fiabilité, en sécurité, en temps et en coût et pour sauvegarder la santé des opérateurs-techniciens concernés. Nous avons également mis en évidence grâce à nos observations chez un hélicoptériste que le facteur humain est bien pris en compte en maintenabilité, mais à travers une approche relevant uniquement de l'ergonomie physique. De plus, l'étude des temps de maintenance soulève, partiellement des questions relatives à l'ergonomie organisationnelle, ainsi cette dimension fait également l'objet d'étude dans les services de maintenabilité.

Ainsi, nos résultats traduisent chez cet industriel une prise en compte de l'ergonomie physique par les ingénieurs-concepteurs sur l'ensemble du processus de conception, en phase préliminaire, basée

essentiellement sur des outils numériques de simulation. Cette démarche n'intègre pas l'ensemble des composantes de l'ergonomie en accord avec la définition donnée par l'IEA (2000). En effet, il est nécessaire de se baser sur une analyse précise des activités de travail conduites par les opérateurs-techniciens, dans leur environnement, pour intégrer en plus de la dimension physique de l'ergonomie, les dimensions les composantes cognitive et organisationnelle [16]. Nos premiers résultats semblent donc mettre en évidence des manques relatifs à deux volets de l'ergonomie. Ainsi, les savoirs et savoir-faire des opérateurs sont peu considérés, l'activité des opérateurs est réduite à une suite d'opérations élémentaires sans prendre en compte les habitudes, expertises, connaissances, compétences des opérateurs. Cette approche uniquement normative ne permet pas de prendre en considération la valeur ajoutée et l'expertise métier de chaque opérateur de maintenance. Elle ne permet pas non plus de prendre en considération les variabilités d'environnements physiques, sociaux, culturels dans lesquelles l'activité de maintenance se déroule.

Cette observation confirme les travaux de la littérature. En effet, que ce soit en aéronautique, au sein des constructeurs automobiles ou dans l'industrie en générale, les études de maintenabilité laissent peu de place à l'analyse de l'activité de travail des opérateurs, mais aussi à leurs caractéristiques, leurs attentes et leurs besoins. Ainsi, dans le secteur de l'aviation, les études montrent une forte utilisation des modeleurs, des mannequins numériques et de la réalité virtuelle, pour évaluer essentiellement l'accessibilité et les collisions associées, le champ de vision et ponctuellement les efforts via la méthode RULA que propose certains modeleurs comme CATIA V5 [27][29][30][31]. Dans le secteur automobile, on observe principalement des travaux liés à l'évaluation de l'accessibilité mais également de l'assemblage/désassemblage. Ces approches regardent notamment les interactions avec l'environnement [9][32]. Des études se sont également penchées sur l'industrie courante avec la maintenance des machines-outils. La littérature, toujours à travers les outils de simulations numériques et plus particulièrement la réalité virtuelle, tente d'évaluer les collisions ou encore l'assemblage [3][33].

L'ensemble de notre observation industrielle associée à la littérature issue de différents domaines applicatifs nous permet de mettre en évidence que :

- La volonté d'intégrer l'ergonomie en maintenabilité est bien réelle mais se limite souvent à l'ergonomie physique et donc aux aspects normatifs associés. La littérature et l'analyse des pratiques industrielles convergent sur les lacunes dans l'utilisation de méthodes et d'outils permettant une analyse de l'activité de maintenance intégrant ses composantes cognitives et organisationnelles.
- Les outils de simulation physique et numérique restent assez peu exploités pour étudier l'intégration du facteur humain en maintenabilité

5 CONCLUSION & AXES DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

A travers notre étude des pratiques industrielles et une première analyse de la littérature, il apparaît que le domaine de la maintenabilité se focalise sur l'ergonomie physique et omet l'analyse de l'activité qui est la base de toute étude ergonomique. De plus, les outils d'observation ergonomique sont sous-exploités au profit de l'utilisation d'outils numériques de simulation.

Afin d'aller plus loin dans notre analyse il s'agira, dans un futur proche, de cartographier avec précision les compétences et connaissances en ergonomie des ingénieurs-concepteurs en maintenabilité chez l'hélicoptériste qui fait l'objet de notre recherche. Nous nous attarderons particulièrement sur leur formation, sur leur rôle dans le service maintenabilité et sur les étapes du processus de conception de la maintenabilité où leurs compétences et connaissances en ergonomie sont utilisées. Pour poursuivre nos

travaux sur l'utilisation des outils de simulation, nous nous focaliserons notamment sur leur double rôle d'une part d'aide à l'évaluation ergonomique, d'autre part d'objets intermédiaires de conception favorisant ainsi le travail collaboratif et la convergence interdisciplinaire [34]. Ces questions seront soulevées dans le cadre du contexte particulier de la maintenabilité aéronautique. En effet, il s'agira d'élargir nos recherches bibliographiques, en termes de méthodes et d'outils, dans d'autres domaines, où le facteur humain est intégré au processus de conception afin de nourrir nos réflexions et proposer des solutions dédiées aux problématiques spécifiques de la maintenabilité en aéronautique.

L'objectif, à termes, sera de créer des outils pour les ingénieurs-concepteurs permettant de mettre en place une analyse ergonomique plus globale, tenant compte des aspects physiques mais également cognitifs et organisationnels. Cette démarche devra s'appuyer sur les outils existants que possèdent et maîtrisent les ingénieurs-concepteurs en maintenabilité, à savoir des outils de simulation numérique ou encore des maquettes physiques.

REFERENCES

- [1] Shanmugam, A., and T. Paul Robert. "Human factors engineering in aircraft maintenance: a review." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 21.4 (2015): 478-505.
- [2] Chang, Yu-Hern, and Ying-Chun Wang. "Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians." *Safety science* 48.1 (2010): 54-62.
- [3] Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital Human Models and Virtual Ergonomics to Improve Maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(1), 10-19.
- [4] 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.
- [5] Smith, David J. *Reliability, Maintainability and Risk 8e: Practical Methods for Engineers Including Reliability Centred Maintenance and Safety-Related Systems*. Elsevier, 2011.
- [6] Leonard, D. (1995). *Wellspring of knowledge*. Boston: Harvard Business School.
- [7] 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.
- [8] Latorella, Kara A., and Prasad V. Prabhu. "A review of human error in aviation maintenance and inspection." *International Journal of Industrial Ergonomics* 26.2 (2000): 133-161.
- [9] Di Gironimo, Giuseppe, G. Monacelli, and S. Patalano. "A design methodology for maintainability of automotive components in virtual environment." *DS 32: Proceedings of DESIGN 2004, the 8th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia. 2004*.
- [10] Hobbs, Alan, and Ann Williamson. "Associations between errors and contributing factors in aircraft maintenance." *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 45.2 (2003): 186-201.
- [11] Dhillon, B. S., and Y. Liu. "Human error in maintenance: a review." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12.1 (2006): 21-36.

- [12] 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.
- [13] CEN/TC319.EN13306:2010, Maintenance-maintenance terminology. European Standard, Bruxelles 2010
- [14] 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.
- [15] Berrah, Lamia. *L'indicateur de performance: Concepts et Applications*. Cépadues-Editions, 2002.
- [16] Falzon, P. (2004). *Ergonomie*. Presses universitaires de France.
- [17] 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.
- [18] Maline, J., & Pretto, J. (1994). *Simuler le travail: une aide à la conduite de projet*. Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail.
- [19] Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités*, 4 (2), 77-83.
- [20] 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.
- [21] Kaljun, J., Dolšak, B. (2012). "Ergonomic design knowledge built in the intelligent decision support system International". *Journal of Industrial Ergonomics*, 42, pp 162-170.
- [22] Perez, J., de Looze, M. P., Bosch, T., & Neumann, W. P. (2014). Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(2), 298-306.
- [23] Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*.
- [24] Kaljun, J., Dolšak, B. (2012). "Ergonomic design knowledge built in the intelligent decision support system International". *Journal of Industrial Ergonomics*, 42, pp 162-170.
- [25] Sagot, J. C., Gouin, V., & Gomes, S. (2003). Ergonomics in product design: safety factor. *Safety science*, 41(2), 137-154.
- [26] 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).
- [27] Shi, Yongsheng, and Yu Liu. "Application of DELMIA on Maintainability Design of Aircraft." *Proceedings of the 2012 International Conference on Computer Application and System Modeling*. Atlantis Press, 2012.
- [28] Jayaram, U., Jayaram, S., Shaikh, I., Kim, Y.J. & Palmer, C. (2006). Introducing quantitative analysis methods into virtual environments for real-time and continuous ergonomic evaluations. *Computers in Industry* 57, 283-296.
- [29] Rice, S. (2004). Boeing human modeling system.
- [30] Marzano, A., Friel, I., Erkoyuncu, J. A., & Court, S. (2015). Design of a Virtual Reality Framework for Maintainability and Assemblability Test of Complex Systems. *Procedia CIRP*, 37, 242-247.

- [31] Amundarain, A., Borro, D., García-Alonso, A., Gil, J. J., Matey, L., & Savall, J. (2004). Virtual reality for aircraft engines maintainability. *Mecanique & industries*, 5(02), 121-127.
- [32] 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.
- [33] Seth, A., Vance, J.M., Oliver, J.H. (2011). "Virtual reality for assembly methods prototyping: a review". *Virtual reality*. 15-1, pp 5-20.
- [34] Vinck, D. (2009). De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(1), 51-72.

Contact principal : Fabien BERNARD

Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Département EDIM - Equipe ERCOS
90010 Belfort Cedex
Fabien.bernard@utbm.fr
Fabien.bernard@airbus.fr