

CONCEPTION POUR LA MAINTENABILITE : ETAT DE L'ART DES EFFORTS D'INTEGRATION DE L'ERGONOMIE POUR LA MAINTENANCE AERONAUTIQUE

Fabien BERNARD, Morad MAHDJOUR, Antoine VARRET, Florence BAZZARO ; Jean-Claude SAGOT

Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société (IRTES) - Equipe de recherche en ERgonomie et CONception de Systèmes (ERCOS) - Université de Technologie de Belfort-Montbéliard - Belfort, France.

fabien.bernard@utbm.fr; morad.mahdjoub@utbm.fr; antoine.varret@utbm.fr ; florence.bazzaro@utbm.fr;
jean-claude.sagot@utbm.fr

RESUME

Pour mieux prendre en compte l'Homme dans les activités de maintenance, la maintenabilité considère désormais les exigences ergonomiques qu'il convient d'intégrer et de valider, tout en respectant les contraintes mécaniques. Les outils de simulation numériques, mannequins numériques ou technologies de réalité virtuelle, sont aujourd'hui très utilisés dans le processus de conception et notamment pour les études de maintenabilité. Leur rôle, est notamment d'améliorer les prises de décisions autour de ces nouvelles exigences qu'apporte l'ergonomie. Cependant des travaux mettent en évidence un manque d'optimisation (compromis) du produit entre les contraintes mécaniques et les exigences ergonomiques. Ainsi, l'objectif des travaux scientifiques exposés dans cet article est d'identifier, à travers un état de l'art, les limites des outils de simulation numériques pour évaluer l'ergonomie des tâches de maintenance en phase de conception préliminaire. Ce travail est réalisé dans le cadre de la préparation d'une thèse CIFRE dans le domaine de la maintenabilité aéronautique et plus spécifiquement sur les hélicoptères.

Mots-clés: Design For Maintainability (DFM), Design for Assembly (DFA), ergonomie, conception mécanique, Réalité Virtuelle (VR),

1 INTRODUCTION

L'innovation, qui est un élément clé de la compétitivité [Leonard, Barton, 1995], a lieu à l'interface entre différentes disciplines ou spécialisations [Cardile, 2004]. Cette approche demande de mettre en œuvre des méthodologies de conception et de développement de produits, qu'elles soient intégrées et/ou issues du Design For X, DFX, pour assurer la collaboration inter-métier et l'intégration de chaque besoin relatif à la rationalisation du produit en termes de qualité, de coût et de délai [Huang & Mak, 1991]. Dans cette lignée, de nombreux travaux [Sagot et al, 2003] [Mahdjoub et al, 2013] ont proposé des méthodes et des outils pour

intégrer l'ergonomie dans le processus de conception de produits/systèmes afin de favoriser l'innovation. L'intégration des critères ergonomiques est une question étudiée, depuis de nombreuses années, dans le domaine de la maintenabilité, pour les tâches de maintenance sur des systèmes complexes, notamment sur les séquences de montage et de démontage [Abdullah et al, 2007] [De Sa & Zachmann, 1999]. En effet, la maintenabilité fait partie de ses domaines qui se situent à la frontière de différentes disciplines comme l'ingénierie mécanique et l'ergonomie. Ainsi, selon la norme NF EN 13306, intitulée « Maintenance - Terminologie de la maintenance » de 2001, la maintenabilité correspond à « l'aptitude, caractérisée par la facilité, d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits ». La prise en compte de ces facteurs dans le domaine de la maintenabilité et donc de la maintenance est d'autant plus nécessaire devant le constat qui est fait par l'Association Française des Ingénieurs et responsables de Maintenance, AFIM. En effet, une étude a été réalisée en 2006-2007 sur la pénibilité des métiers de maintenance avec le soutien du Ministère du Travail. Cette enquête réalisée auprès d'un échantillon de plus de 2 500 professionnels de différents métiers des secteurs industriels et tertiaires révèle que 62 % d'entre eux jugent leur métier pénible [AFIM, 2007]. Hors, rappelons que depuis 2012, l'employeur a une obligation légale de mettre en œuvre des actions de prévention des risques professionnels et de la pénibilité au travail (**Code du travail - Article L4121-1**). La pénibilité au travail se définit par une exposition à un ou plusieurs facteurs de risques professionnels liés à des contraintes physiques marquées, un environnement physique agressif ou à certains rythmes de travail, susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur la santé (**Code du travail, article L4121-3-1**). Les industriels sont bien conscient de cette exigence en termes de pénibilité, cependant le constat des pratiques actuelles fait apparaître la difficulté, dans un processus de développement, de préserver le bon compromis dans l'optimisation mécanique d'un système/produit lorsque les critères ergonomiques sont intégrés. En effet, le compromis entre exigences ergonomiques et contraintes mécaniques établi à la genèse du projet se dissipe progressivement au fur et à mesure de l'avancement de chaque étape à la faveur des contraintes mécaniques. Selon Broberg (2007), cela s'explique souvent par le fait qu'il y a rarement des ergonomes associés au projet de conception, et qu'une majorité des ingénieurs concepteurs manquent de connaissances en ergonomie. Ainsi, ils conçoivent des systèmes/produits en se fiant à leur propre intuition et expérience.

Pour répondre à ce constat, de nombreuses entreprises essaient de mieux intégrer les exigences ergonomiques dans le processus de conception de produits. Par exemple, des études sur l'accessibilité et les postures ont pu être menées grâce aux outils de simulation numérique [Regazzo ni et Rizzi, 2014] [Baek et Lee, 2012]. L'objectif des travaux scientifiques exposés dans cet article est de s'intéresser à cette approche afin d'identifier les limites des outils numériques pour évaluer l'ergonomie des tâches de maintenance en phase préliminaire. Pour ce faire, nous proposons une analyse critique de l'état l'art détaillée dans le plan suivant.

L'article se découpera en plusieurs parties. Dans un premier temps, l'état de l'art nous amènera à détailler le contexte global de notre recherche en nous intéressant à l'organisation générale de la maintenance dans le secteur aéronautique et les problèmes qui en découlent. Par la suite, nous tenterons de comprendre comment la maintenance des produits est devenue indispensable pour les industriels et comment, à travers la maintenabilité, ils ont intégré cet aspect dans le processus de conception de produits/systèmes. Nous nous focaliserons ensuite plus

en détails sur les méthodes et les outils de simulation numériques utilisés lors des études de maintenabilité qui permettent actuellement d'évaluer l'ergonomie en phase préliminaire de conception. Il s'agira notamment d'identifier les outils reposant sur l'utilisation des mannequins numériques puis ceux s'intéressant à l'utilisation de la réalité virtuelle. En synthèse nous ferons un premier constat sur les limites de ces outils, notamment au regard des pratiques industrielles que nous présenterons succinctement. Ce constat nous amènera à proposer la problématique générale de nos futurs travaux de thèse CIFRE qui chercheront à améliorer l'utilisation de ces outils de simulation numérique notamment grâce au déploiement de procédures d'utilisation.

2 ETAT DE L'ART

2.1 Contexte : organisation de la maintenance dans le secteur aéronautique.

Deux types de maintenance sont aujourd'hui connus dans le secteur aéronautique : la maintenance préventive et la maintenance corrective. Un aéronef subit une réglementation drastique par l'**OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale)** et connaît quatre grands types de vérification dans lesquelles peuvent s'effectuer une des deux maintenances :

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

-Visite B appelée « Check B » : tous les mois pendant une nuit, elle voit la vérification de tous les systèmes de secours (portes, toboggan, masque à oxygène etc.)

-Visite C appelée « Check C » : tous les 12-18 mois, l'avion est mis en hangar pendant une semaine. Tous les appareils électroniques sont testés, tout comme la structure. Les tests sont non destructifs (par exemple, ultra-son). Les moteurs ou encore le câblage des gouvernes sont également vérifiés.

-Visite D appelée « Check D » : appelée aussi GV (Grande Visite), elle a lieu tous les 4 à 5 ans et dure environ 3 mois. L'avion est entièrement démonté et les pièces d'usures (pièces moteurs, avionique etc.) ou abîmées sont changées. L'avion repart alors avec un niveau de fiabilité équivalent à sa mise en service, avec les dernières améliorations préconisées par le constructeur.

Pour toutes ces visites de maintenance, seules les deux dernières sont de l'ordre du correctif. Mais il apparaît que les check A et B sont des visites préventives qui peuvent devenir correctives si nécessaire. L'appareil doit donc être prêt à subir une intervention à n'importe quel moment, partout dans le monde par des personnes de formations différentes et dans des conditions qui peuvent fortement varier.

La figure 1, ci-dessous, illustre le vieillissement croissant de l'appareil. Les visites A et B sont essentiellement préventives alors que les visites C et D ont un double rôle, préventifs et correctifs. Cette organisation entraîne des durées d'immobilisation plus longues mais ces deux

dernières visites permettent d'assurer un allongement de la fiabilité technique de l'appareil à plus long terme. Ainsi, le vieillissement naturel et irrémédiable est moins rapide, il est contrôlé par les diverses interventions qui permettent de conserver un haut niveau de fiabilité et de qualité pour les éléments vitaux de l'appareil. La figure 1 illustre ainsi les fluctuations du niveau de fiabilité. Ce dernier est défini par le temps de bon fonctionnement d'un appareil entre deux étapes de maintenances planifiées [Dhillon, B. S. & Y. Liu., 2006]. Ce niveau augmente après chaque fin de séquence de maintenance. De plus, plus le niveau de fiabilité baisse, plus la séquence de maintenance est longue et complexe. Avec le temps, nous pouvons noter également que le niveau de fiabilité décroît progressivement et n'atteint plus jamais le niveau maximal. Lorsque ce niveau de fiabilité a atteint un seuil minimal ne garantissant plus la sécurité optimale décidée par les organismes internationaux et nationaux, l'aéronef est retiré.

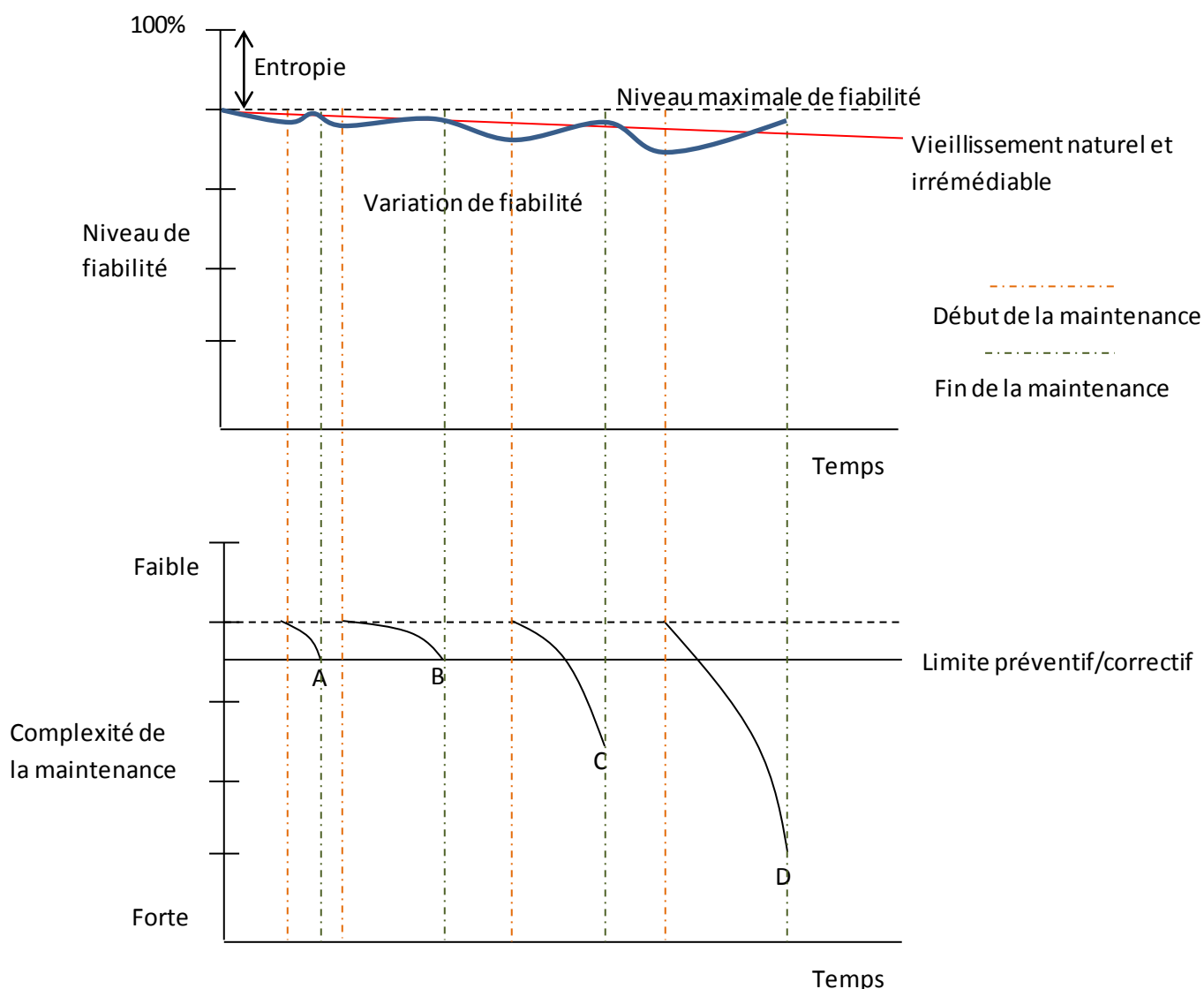


Figure 1 : Organisation de la maintenance aéronautique ; graphe français et adapté de "Aviation Maintenance Management" by Harry A, Kinnison, 2004

Afin de gagner en fiabilité humaine et technique, et aussi en temps pour chaque étape, l'industrie aéronautique, poussée par ses clients, a cherché à comprendre l'activité de l'Homme dans la tâche de maintenance. Il a, en effet, été déterminé qu'un grand nombre d'incidents lors de l'utilisation de l'appareil (en vol ou au sol) était dû à une erreur humaine lors des séances de maintenance. Des recherches ont permis de les quantifier et les classer, preuve de leur importance [Dhillon, B. S. & Y. Liu., 2006]. De même, la fréquence de ces accidents et leur sévérité ont été étudiées en fonction de leurs causes : conception inadaptée des produits/systèmes ; conditions de travail (lumière, bruit, espace de travail) ; fatigue cognitive ; déficit attentionnel ; manque de connaissances, etc. [Krulak, David C., 2004]. Les compagnies aériennes sont demandeuses d'une telle évolution d'autant qu'aujourd'hui, la maintenance représente entre 12% et 15% par an des dépenses totales [Čokorilo, O., 2011]. Dans le secteur aéronautique et le domaine des hélicoptères, les ratios heures de maintenance/heures de vol présentent un enjeu prioritaire. Pour des hélicoptères lourds, selon certains constructeurs, la moyenne est aujourd'hui de 8 heures de maintenance par heure de vol. L'objectif affiché à long terme est de deux heures de maintenance par heure de vol. Les compagnies aériennes sont demandeuses d'une telle évolution notamment pour réduire les coûts et augmenter la fiabilité à long terme.

Pour répondre à cette problématique, plusieurs axes de réflexions peuvent être abordés, en ce qui nous concerne nous nous focaliserons sur les questionnements scientifiques relatifs à la prise en compte de l'homme dans la dimension gestuelle et posturale de son activité de travail ainsi qu'à ses conditions de travail (espace de travail, travail en hauteur, etc.). Notre objectif est notamment de nous concentrer sur la prise en compte des exigences ergonomiques afin de minimiser les erreurs dues aux conditions de travail, à de la fatigue physique, à de la pénibilité au travail, par exemple.

Avant-même de s'intéresser à ces problématiques d'intégration de l'ergonomie pour favoriser la maintenance des systèmes telle qu'elle est définie aujourd'hui, les industriels avaient pris conscience que leur produit, avant d'être utilisé, devait être assemblé, ainsi les travaux précurseurs pour améliorer les études de maintenabilité, sont issues du Design For Assembly (DFA).

2.2 DU DESIGN FOR ASSEMBLY (DFA) à la MAINTENABILITE

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

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

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

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

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

2.3 DESIGN FOR MAINTAINABILITY (DFMaint)

Aujourd'hui, dans la littérature du domaine, de nombreuses méthodes formalisent les études de maintenabilités à travers des objectifs de réduction de coûts, de temps de maintenance et de fréquence (Serghides & Fielding, 1987; Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Nottingham et al., 1997; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Lee et al., 2007; Rui et al., 2009; Ding, 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen, 2015). Certaines reposent sur la mise en place de processus d'analyses des produits (Nottingham et al., 1997; Lee et al., 2007; Ding, 2009), ou sur des analyses mathématique et probabilistes (Serghides & Fielding, 1987; Wani & Gandhi, 1999), d'autres sur l'application de normes ergonomiques dédiées à la maintenabilité dans le domaine aéronautique (ATA, 2000; ATSB, 1997; CAA, 2002), enfin la dernière catégorie de méthodes repose sur des outils de conception permettant de définir et de simuler des tâches de maintenance (CAO, mannequin numérique, réalité virtuelle (Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Rui et al., 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen 2015). Cette dernière catégorie nous intéresse plus particulièrement.

Dans le cadre de cette approche reposant sur l'étude et la simulation des tâches de maintenance, différentes approches et outils peuvent être utilisés : [Lee, S. et al, 2008] :

- Définition et mise en œuvre de cartes de travail : cet outil permet de caractériser les séquences et les tâches de maintenances à réaliser dans le but d'accroître la productivité, de gagner du temps et de l'argent tout en réduisant la pénibilité au travail.
- Conception d'outils 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.

- Conception d'une architecture du produit favorisant la maintenance (prise en main, effort de démontage etc...). Ici, la difficulté est de conserver l'efficacité mécanique et esthétique du produit tout en y intégrant les facteurs humains.

Cette liste non exhaustive et les quelques exemples présentés mettent en évidence la dynamique scientifique du domaine mais soulève néanmoins un certain nombre d'interrogations. En effet, quelques méthodes et outils proposent l'intégration de la simulation numérique pour étudier les tâches de maintenance (**Gomes de Sa & Zachmann, 1999; Amundarain et al., 2002; Di Gironimo et al., 2004; Rui et al., 2009; Yongsheng & Liu, 2012; Kruger–Nguyen 2015**), , d'autres s'intéressent à l'intégration des normes et recommandations ergonomiques, (**ATA, 2000; ATSB, 1997; CAA, 2002**) mais peu de méthodes formalisées semblent proposer une intégration systématique des exigences ergonomiques dans les études de maintenabilité. Nous détaillons ce point.

2.4 L'ergonomie et simulation numérique dans la maintenabilité

Il convient maintenant d'observer comment l'ergonomie est évaluée dans les études de maintenabilité. Afin de concevoir et d'évaluer les nouveaux concepts, de nombreux outils existent pour suivre et valider le projet d'un point de vue ergonomique. Parmi ces outils, le numérique a largement pris le pas pour expertiser, évaluer et prendre des décisions lors des phases préliminaires de conception. Nous pouvons citer notamment les simulations par mannequins numériques paramétrables qui permettent l'intégration de l'ergonomie dans les phases amont du processus de conception, qu'il s'agisse du produit, mais également de sa fabrication ou de sa maintenance [**Perez & al 2014**] [**Kruger – Nguyen 2015**]. Nous pouvons aussi citer les travaux de **Rasmussen (2002, 2003)** sur le mannequin numérique ANYBODY qui ont pour objectif de coupler certains critères géométriques d'un futur produit et des exigences ergonomiques dans une démarche d'optimisation multidisciplinaire. Cependant, ces outils ne permettent pas d'anticiper l'activité des opérateurs lors des séquences de maintenance. De même, il est difficile de prendre des décisions et de valider des modèles sur ces seuls outils.

C'est pourquoi les outils de réalité virtuelle (RV) sont vus comme une solution efficace quant à l'évaluation et à la prise de décision autour d'exigences venant de plusieurs métiers, notamment de la mécanique et de l'ergonomie [**Craig, Sherman, & Will, 2009**] [**Lorisson, 2006**] [**Lorisson, 2010**]. La RV a démontré tout son intérêt pour améliorer les phases de prise de décision multidisciplinaires, la compréhension de simulations numériques complexes [**Gherbi et al., 2006**]. Elle est aussi très présente pour simuler et valider des tâches d'assemblage/désassemblage, de maintenance dans différents domaines comme celui de l'aéronautique [**Garza et al., 2013; Seth et al., 2011**], mais également très utilisée comme outil d'analyse et d'évaluation ergonomique de produits et activités associées [**Craig et al., 2003; Lorisson, 2006**]. C'est un outil qui est mis en œuvre pour favoriser la prise en compte de l'activité future des opérateurs [**Sagot et al., 2003 ; Chitescu et al., 2003**] à travers des analyses qualitatives auprès des experts métiers mais aussi des futurs utilisateurs. Aujourd'hui, de nombreux travaux proposent de compléter ces résultats subjectifs par des analyses objectives basées sur des données quantifiées en évaluant l'activité future de l'opérateur, qui sera mise en

œuvre sur le poste de production. Nous pouvons citer par exemple les travaux de **Jayaram (2006)** qui propose d'évaluer des tâches d'assemblage réalisées par un opérateur réel en environnement virtuel à l'aide d'une méthode d'évaluation de posture qui donne un score calculé à partir de données quantifiées (position des membres de l'opérateur réel). Ainsi, par exemple, dans un objectif de prévention des TMS (Trouble Musculo-Squelettique), l'équation du NIOSH [**Waters, Putz-Anderson, Garg, & Fine, 1993**] et le RULA (Rapid Upper Limb Assessment) [**McAtamney & Corlett, 1993**] ont été mise en œuvre en réalité virtuelle respectivement dans les études de **Chryssolouris, Mavrikios, Fragos, & Karabatsou en 2000** et de **Shaikh et al. en 2003**. La première permet d'évaluer les contraintes dorsolombaires liées à des ports de charge, le second, le RULA a pour vocation d'étudier les postures des différents membres supérieurs (poignet, avant-bras, bras, dos, nuque, tête) Les plates-formes de réalité virtuelle sont donc une excellente opportunité d'évaluations et de prises de décisions autour du DFMA avant le développement d'une maquette physique plus coûteuse [**De Sa, A. G., et Zachmann, G. 1999**].

Afin d'illustrer notre propos, nous présentons quelques exemples d'utilisation des outils de simulation numérique à des fins de prise en compte du facteur humain, issue du domaine automobile, précurseur dans le domaine qui nous intéresse, et celui qui fait l'objet de notre étude, l'aéronautique.

Le domaine automobile prend très au sérieux la maintenance et la facilité à réaliser les actions associées. Les nouvelles méthodes numériques permettent d'anticiper de plus en plus tôt le design de chaque pièce voire d'un ensemble de pièces. Certaines études se concentrent sur les indicateurs permettant d'évaluer chaque pièce ou système dans les tâches de maintenance. Trois critères sont aujourd'hui quantifiés et évalués pour confirmer ou non des pièces d'un système mécanique, de manière unitaire, dans leur contexte de maintenance : désassemblage, accessibilité, utilisabilité [**Di Gironimo, G. et al, 2004**]. Nous pouvons d'ailleurs préciser que cette étude a utilisé le mannequin numérique Jack (EAI-UGS) pour toutes ces évaluations ergonomiques. Il est à noter que des logiciels de simulations numériques tel que CATIA et DELMIA sont également utilisés pour évaluer et simuler des tâches de maintenance en 2D, même s'il ne remplace pas les plus-value apportées par les technologies de réalité virtuelle [**Gynn, M., & Steele, J. (2015)**]. Le secteur automobile a également intégré les opérateurs dans les processus de conception et de validation des systèmes en vue d'améliorer la maintenance. La formation des opérateurs pour certaines phases de maintenance se fait également sur plate-forme de réalité virtuelle afin de s'assurer de la bonne manipulation des produits/systèmes développés, on parle ainsi de l'apprentissage des gestes et des postures. Le montage et le démontage des moteurs a notamment été étudié dans ce but précis de l'apprentissage [**Wu, X., & Fei, G., 2011**]. Ces mêmes plates-formes de RV servent également à prise de décisions multi-métiers (**Lorisson, 2006, pour une revue de question sur l'utilisation de la RV chez PSA Peugeot Citroën**). La recherche essaie également d'améliorer la coordination des transferts de données entre la CAO et la réalité virtuelle, l'information ne devant pas se perdre. Le problème principal posé par **De Sa, A. G., et Zachmann, G, 1999** est l'itération entre les phases numériques et physiques qui sont longues et répétitives. Les nouvelles méthodes permettent désormais de passer du modèle numérique à une plate-forme de réalité virtuelle sans perte de données mais l'inverse reste complexe à mettre en œuvre.

L'industrie aéronautique essaie également d'utiliser en premier lieu les outils de conception assistés par ordinateur pour intégrer l'ergonomie dans le processus de conception d'aéronefs.

Nous retrouvons d'ailleurs des outils similaires avec les mannequins numériques. CATIA et DELMIA qui ont fait l'objet d'études pour vérifier des tâches de maintenance, notamment avec l'évaluation de postures, d'efforts ou encore des champs visuels [Shi, Yongsheng et Yu Liu., 2012]. Au-delà de l'aspect CAO, le secteur aéronautique a été l'un des premiers à utiliser les technologies de la réalité virtuelle pour évaluer l'ergonomie des interfaces Homme-machine (IHM). Elle a d'abord été intégrée pour simuler des séquences de vol dans des simulateurs statiques ou dynamiques à la fin de la Seconde Guerre Mondiale [Smith, T. M., 1976]. Ainsi, des simulateurs ont vu le jour pour apprendre aux pilotes les instruments de bord et leur impact sur le comportement de l'appareil [Horeman et al, 2015].



Le simulateur suivant (photo 1) est l'un des seuls encore existant, il est présenté ici au musée de la guerre de Christchurch en Nouvelle-Zélande (New-Zealand Museum of War in Christchurch). Des vérins permettent des mouvements réalistes en fonction des actions appliquées sur les commandes.

Photo 1: premier simulateur de vol, nommé "Link Flight Trainer" (New-Zealand Museum of War in Christchurch, New-Zealand)

Plus récemment, l'utilisation de la réalité virtuelle s'est étendue aux phases de conception. L'interaction qu'elle procure entre l'utilisateur et l'environnement immersif permet de simuler des tâches comme celles de la maintenance dans le secteur aéronautique [Garza et al, 2013] [Seth et al, 2011]. Les industriels se sont plus précisément attardés sur les zones sensibles qui nécessitent des actions régulières comme sur les moteurs. L'accessibilité étant peu aisée, les plates-formes de réalité virtuelle ont permis de déterminer des tâches de maintenance mais également les futures contraintes que pourraient subir un opérateur [Amundarain et al, 2003]. L'étude de Amundarain et al., a par exemple, montré l'importance de l'étude du champ visuel pour manipuler les pièces dans un environnement complexe, là encore sur la maintenance des moteurs. Cette problématique de la maintenance des moteurs a également fait l'objet d'études reposant sur des retours physico-sensoriels. Le système haptique étudié s'est révélé performant sur l'ensemble du poste de travail à l'échelle du moteur. En effet ce système suivait l'opérateur dans son déplacement et a permis d'assurer le diagnostic de différentes positions. Ce système, dédié à un moteur spécifique, a permis d'étudier l'aspect ergonomique des tâches simulées. Les systèmes haptiques sont un réel enjeu de développement et doivent permettre d'aboutir à une évaluation optimale, puisqu'ils vont au-delà de l'immersion visuelle et sonore [Savall, J. et al 2002].

Pour compléter cet état de l'art, nous proposons de détailler succinctement le constat industriel du quel est né la demande de thèse CIFRE. Le projet, en cours de définition, étant confidentiel, il nous est difficile de détailler précisément le constat industriel. Nous en donnons néanmoins un aperçu. Ce dernier devra être complété lors d'une première expérimentation d'étude de l'existant au cours de notre première année de thèse.

3 CONSTAT INDUSTRIEL

Les pratiques industrielles, que nous avons pu observer lors d'un stage de fin d'études, semblent refléter que l'ergonomie est prise en compte dans les phases de conception de produit mais rien ne semble permettre de garder le compromis mécanique/ergonomie sur toutes les phases de conception. En effet, au-delà des outils en maintenabilité détaillés ici, le constat observé chez l'industriel aéronautique fait état d'une prise en compte de l'ergonomie en phase préliminaire du projet mais le produit évalué n'est finalement pas optimisé de ce point de vue.

L'étude des pratiques industrielles met également en évidence que les outils identifiés dans notre état de l'art, mannequin numérique, réalité virtuelle, sont utilisés, mais sans forcément être exploités à leur pleins potentiels. En effet, derrière les mannequins numériques et les codes couleurs qui peuvent apparaître pour indiquer si l'accessibilité est aisée, il y a des normes qui ne sont pas connues par ceux qui les utilisent. L'évaluation n'est donc pas optimale. Encore une fois, le monde industriel montre que dans le cas de la maintenance, seul les retours clients et des opérateurs servent de références aux études de maintenabilité. Il n'y a que très peu d'analyse de l'activité de travail avec une approche méthodologique pour la maintenance qui pourrait permettre d'accroître la pertinence des études de maintenabilité d'un point de vue ergonomie. La conception d'un produit pour la maintenance s'inscrit dans un univers collaboratif où différents métiers doivent collaborer. Les paramètres ergonomiques sont aujourd'hui traités de manière indépendante et les outils d'évaluation, pourtant bien présents, sont mal utilisés. La méthodologie pour intégrer ces paramètres dans le processus de conception est aujourd'hui mal adaptée dans le secteur aéronautique. Il en résulte des produits avec une faible utilisabilité et souvent non adaptés à l'environnement pour lequel il a été étudié. Ce constat est fait malgré l'utilisation d'outils numériques performants durant le processus de conception. Nous pouvons alors déduire qu'un manque de connaissances, de méthodes et de collaborations pourrait être une des raisons entraînant la conception de produits non aboutis, notamment en ce qui concerne les facteurs humains.

4. ORIENTATION DE LA RECHERCHE ET CONCLUSION

Notre état de l'art, ainsi que l'étude des pratiques industrielles mettent en évidence que de nombreux outils numériques existent et sont utilisés pour analyser et valider l'ergonomie pendant les phases de conception préliminaire en maintenabilité aéronautique. Cependant, aux vues des constats industriels la recherche doit s'orienter vers une meilleure compréhension de ces derniers dans le contexte de la maintenabilité en vue de favoriser la convergence multi-métiers, plus spécifiquement entre les sciences de la conception et de l'ergonomie. En effet, les outils de simulations numériques existent également dans les processus de dimensionnement mécaniques ainsi que dans les décisions qui sont prises concernant les solutions de maintenance. C'est le domaine du SBD (Simulation Based Design), qui regroupe les méthodologies de conception pour lesquelles la simulation numérique est le premier moyen d'évaluation et de validation de la conception [Shephard et al. 2004]. Ceci s'explique par le fait que c'est un outil visuel puissant permettant d'améliorer la compréhension du comportement du produit [Lehtonen 2006].

Les simulations sont souvent complexes et la manipulation de variables multiples, qui comportent souvent des interactions, est délicate. Cet aspect relève du domaine de l'optimisation [Aittokoski 2007] qui est lui aussi très présent dans le secteur aéronautique pour les mêmes raisons d'allègement des structures. Lorsqu'on parle d'optimisation en conception, il s'agit avant tout d'un outil d'aide à la décision, le choix d'une solution plutôt qu'une autre appartenant au concepteur [Grabener et al., 2008]. C'est un procédé lent, caractérisé par un nombre limité d'analyses de solutions pré-identifiées, et qui n'intègre qu'une partie des contraintes que le produit doit satisfaire. Les concepteurs prennent des risques, d'une part en évaluant les performances des produits que tardivement dans le processus de conception [Yannou et al., 2003], et d'autre part en traitant la question de la tenue mécanique indépendamment des autres contraintes auxquelles le produit est soumis (maintenabilité, ergonomie, fabrication...).

Ainsi la thèse de doctorat, en collaboration entre l'UTBM et un industriel aéronautique, aura pour objectif de déterminer comment, à travers la collaboration et la coopération entre les acteurs métiers, favoriser la prise en compte de l'ergonomie de la situation de travail au cours de toutes les étapes de conception inhérentes aux études de maintenabilité.

REFERENCE

1. 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.
2. 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.
3. Aittokoski T. (2007). "On optimization of simulation based design". Thesis Report. University of Jyväskylä, 113 pages.
4. 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.
5. 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.
6. Baek, S. Y., & Lee, K. (2012). Parametric human body shape modeling framework for human-centered product design. *Computer-Aided Design*, 44(1), 56-67.
7. Boothroyd, G., & Alting, L. (1992). Design for assembly and disassembly. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 41(2), 625-636.
8. Carlile, P. R. (2004). Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries. *Organization science*, 15(5), 555-568.
9. 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).

10. 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.
11. Craig, A. B., Sherman, W. R., & Will, J. D. (2009). *Developing virtual reality applications: Foundations of effective design*. Morgan Kaufmann.
12. Chryssolouris, G., Mavrikios, D., Fragos, D., & Karabatsou, V. (2000). A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 16(4), 267-276.
13. De Belfort-Montbéliard, U. T. B. M. (2003). des facteurs humains dans la démarche de conception. *Cahiers de notes documentaires-Hygiène et sécurité du travail-N*, 191(2e).
14. 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.
15. Dhillon, B. S., and Y. Liu. "Human error in maintenance: a review." *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 12.1 (2006): 21-36.
16. 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.
17. Ding, Y. (2009). Product maintainability design method and support tool based on feature model. *Journal Software Engineering & Applications*, 2, pp 165-172.
18. Garza, L.E, Pantoja, G., Ramirez, P., Ramirez, H., Rodriguez, N., Gonzalez, E., Quintal, R., Perez, J.A. (2013). "Augmented Reality Application for the Maintenance of a Flapper Valve of a Fuller-Kynion Type M Pump". *Procedia Computer Science* 25, pp 154 – 160.
19. Grabener T., Berro A. (2008). "Optimisation multi-objectif discrète par propagation de contraintes". 4th JFPC (Journées Francophones de Programmation par Contraintes), Nantes, France.
20. Gynn, M., & Steele, J. (2015). Virtual Automotive Maintenance and Service Confirmation (No. 2015-01-0498). SAE Technical Paper.
21. Horeman, T., Akhtar, K., & Tuijthof, G. J. (2015). Physical Simulators. In *Effective Training of Arthroscopic Skills* (pp. 57-69). Springer Berlin Heidelberg.
22. Huang, G.Q., Mak, K.L. (1997). "The DFX shell: A generic framework for developing design for X tools". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 13(3), pp 271-280.
23. 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.
24. Krüger, J., & Nguyen, T. D. (2015). Automated vision-based live ergonomics analysis in assembly operations. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*..
25. Krulak, David C. "Human factors in maintenance: impact on aircraft mishap frequency and severity." *Aviation, space, and environmental medicine* 75.5 (2004): 429-432.
26. 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.
27. Leonard, D. (1995). *Wellspring of knowledge*. Boston: Harvard Business School.
28. Lehtonen M. (2006). "Simulation-based design process of smart machines". Espoo 2006. VTT Tiedotteita. Research Notes 2349. 184 pages.

29. Lorisson, J. (2010). Réalité virtuelle dans l'industrie-Développement des produits et des processus. *Techniques de l'ingénieur TE*, 5, 965.
30. 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.
31. Mahdjoub, M. Monticolo, D. Gomes, S. and Sagot, J.C. (2010). "A collaborative Design for Usability approach supported by Virtual Reality and a Multi-Agent System embedded in a PLM environment". *Computer-Aided Design*, 42, pp 402 – 413.
32. Mahdjoub, M., Al Khatib, A., Bluntzer, J. B., & Sagot, J. C. (2013). Multidisciplinary convergence about "product-use" couple: Intermediary object's structure. In *DS 75-5: Proceedings of the 19th International Conference on Engineering Design (ICED13) Design For Harmonies, Vol. 5: Design for X, Design to X*, Seoul, Korea 19-22.08. 2013.
33. Nottingham, C. R., Ortega, R. A., Rangarajan, B., Koch, P.N., Mistree, F., Designing for maintainability in preliminary aircraft engine design. *Proceedings of The 1997 Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conference*. September 14-17, 1997, Sacramento, CA.
34. 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.
35. Rasmussen, J., Damsgaard, M., Christensen, S.T., Surma, E. (2002). Design optimization with respect to ergonomic properties. *J Structural and Multidisciplinary Optimization*, 24, 89-97, doi: 10.1007/s00158-002-0219-x
36. Regazzoni, D., & Rizzi, C. (2014). Digital Human Models and Virtual Ergonomics to Improve Maintainability. *Computer-Aided Design and Applications*, 11(1), 10-19.
37. 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.
38. Sagot, J.C., Gouin, V. and Gomes, S. Ergonomics in product design: safety factor. *Safety Science* 2003, 41(2-3),137 – 154.
39. 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.
40. Seth, A., Vance, J.M., Oliver, J.H. (2011). "Virtual reality for assembly methods prototyping: a review". *Virtual reality*. 15-1, pp 5-20.
41. 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.
42. Smith, T. M. (1976). Project Whirlwind: An Unorthodox Development Project. *Technology and Culture*, 447-464.
43. Shephard, M. S., Beall, M. W., O'bara, R. M., & Webster, B. E. (2004). Toward simulation-based design. *Finite Elements in Analysis and Design*, 40(12), 1575-1598.
44. 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.
45. Varret, A., & Mahdjoub, M. (2013). Innovative teaching approach for the design process of mechanical products. In *DS 75-8: Proceedings of the 19th International Conference on*

Engineering Design (ICED13), Design for Harmonies, Vol. 8: Design Education, Seoul, Korea, 19-22.08. 2013.

46. Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.
47. Wu, X., & Fei, G. (2011, August). Research of Virtual reality technology in Automotive engine Assembly teaching. In *Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), 2011 6th IEEE Joint International* (Vol. 1, pp. 167-169). IEEE.
48. Yannou B., Simpson T.W., Barton R.R., "Towards a conceptual design explorer using metamodeling approaches and constraints programming", DETC2003 / DAC48766
49. Yongsheng, S., & Yu, L. (2012) Application of DELMIA on Maintainability Design of Aircraft. *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*, 4p.