

Nouvelles modalités d'interaction pour des opérateurs de maintenance en milieu contraint : Contribution d'une approche conjointe FH et IHM dans le contexte d'un projet multipartenaire.

Chloé Morel
Hanaë Rateau
Sébastien Bottecchia
ESTIA-PEPSS
Technopole Izarbel
64210 Bidart
c.morel@estia.fr
h.rateau@estia.fr
s.bottecchia@estia.fr

Marion Wolff
Régis Mollard
Univ. Paris Descartes
UMR 8257 COGNAC-G
45, rue des Saints-Pères - 75006 Paris
& ESTIA-PEPSS
Technopole Izarbel
64210 Bidart
m.wolff@estia.fr
r.mollard@estia.fr

Alexis Clay
Immersalis Consulting
ESTIA
Technopole Izarbel
64210 Bidart
& LaBRI, Université de Bordeaux
351, cours de la Libération
33405 Talence
alexis@immersalis-consulting.com

RESUME

Dans un monde où la continuité de service est impérative, la qualité et la rapidité des interventions en maintenance deviennent des éléments clés. Pour conserver leur compétitivité, les industriels recherchent activement des solutions pour améliorer l'efficacité et la productivité des opérations de maintenance tout en préservant un très haut niveau de sécurité.

L'objectif du projet est de permettre à un opérateur de maintenance, sur des terminaux mobiles de type smartphone, tablette, casque ou lunette, de disposer d'une information parfaitement contextualisée à la situation opérationnelle dans laquelle il se trouve (visualiser sur des documents, notices ou des schémas techniques, interagir avec un expert distant, se connecter à un système d'information...).

Cette étude à orientation prospective propose, à partir d'une approche ergonomique centrée sur les usages (observations in situ, entretiens semi-dirigés, analyse cognitivo-discursive - ACD -, caractérisation des besoins), d'identifier un panel de nouvelles technologies d'interaction répondant aux besoins des opérateurs, aux exigences industrielles et pouvant s'adapter à des environnements opérationnels contraints.

Mots Clés

Ergonomie, analyse des besoins, technologies d'interaction innovantes, maintenance.

ABSTRACT

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. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the Owner/Author. Copyright is held by the owner/author. ERGO'IA, 3 - 5 Octobre, 2018, Bidart, France.

As service continuity is compelling for companies in order to satisfy their customers, maintenance quality and efficiency has become key points in the industry.

To maintain their competitiveness, industrial companies strive to improve the efficiency and productivity of maintenance operations while keeping a very high level of safety.

By equipping maintenance operators with a smartphone or tablet and smartglasses, the project aims at giving the right contextualized information. So that operators can better comprehend the context in which they work (e.g. for visualizing documents, notices or technical diagrams, interacting with a remote expert, connecting to an information system...)

The prospective study presented is based on an ergonomic approach and user-centered approach (observations, interviews, cognitive-discursive analysis - CDA - and need characterization). It identifies a panel of new interaction technologies that best respond to operators' expectations and industrial requirements and still being able to adapt to complex and diverse environments.

Keywords

Ergonomic approach, need characterization, new interaction technologies, maintenance.

1. INTRODUCTION

Quel que soit le contexte industriel, les travaux de maintenance représentent un enjeu économique et sécuritaire primordial pour les entreprises. La bonne gestion des opérations de maintenance est devenue un point indispensable pour accroître l'efficacité, la productivité et la sécurité.

Par ailleurs, les métiers de la maintenance sont de plus en plus exigeants. Les évolutions technologiques des équipements de maintenance, la multiplication des procédures et le renouvellement rapide des gammes empêchent les opérateurs d'avoir une bonne visibilité sur les systèmes à maintenir et entraînent des incertitudes sur les opérations à réaliser [3]. Dans ce contexte, la demande des industriels pour intégrer de nouveaux outils d'assistance est donc particulièrement forte.

C'est pour cette raison que le projet SUMATRA (Support aux techniciens de MAintenance sur Terminaux mobiles en Réalité Augmentée) a été créé. Ce projet, financé par un fonds unique interministériel et les régions (FUI-Régions 21) se compose de 9 partenaires (4 partenaires industriels, 3 laboratoires de recherche et 2 entreprises du domaine de la maintenance). Son objectif est de répondre à l'une des problématiques récurrentes présentes dans les interventions de maintenance, l'accessibilité à la documentation. En effet, pouvoir mettre à disposition des opérateurs de maintenance la bonne information ou le bon support en fonction de leur contexte d'intervention est clairement un facteur d'amélioration notable de leur efficacité et de leur sécurité. Pour ce faire, l'idée du projet est de proposer une approche conjointe FH et IHM pour concevoir une maquette se basant sur les nouveaux moyens de visualisation mobiles tels que les lunettes, les casques, mais aussi les tablettes et les smartphones pour accéder à des documents numériques parfaitement contextualisés à la situation opérationnelle. Dans cet article, nous allons présenter l'un des points clés de ce projet, l'approche centrée sur l'humain et son contexte d'usage. C'est à partir de l'identification des pratiques développées sur le terrain que nous proposerons un panorama des outils, technologies, dispositifs et méthodes d'interaction répondant aux besoins des opérateurs.

2. MÉTHODOLOGIES D'ANALYSE DES BESOINS

1.1 Entretien et observation

Deux méthodes complémentaires ont été utilisées pour analyser l'activité des différents utilisateurs finaux : l'entretien semi-directif et l'observation directe en situation, ce qui permet de comprendre les attitudes et les comportements des opérateurs et d'accéder au contenu de leurs représentations [8].

Parmi les partenaires du projet, une entreprise du domaine de la maintenance industrielle et deux entreprises du domaine de la maintenance aéronautique ont été sollicitées. Au total, vingt-cinq entretiens se sont déroulés avec des opérateurs de maintenance après une brève présentation du projet. Ils ont été réalisés en individuel sur le poste de travail, pendant les heures de travail, après avoir obtenu l'accord des personnes interviewées. Les entretiens avaient une durée d'environ 30 minutes et ont été menés en s'appuyant sur un guide d'entretien contenant les thèmes suivants :

- L'activité de l'opérateur de maintenance.
- Les déplacements.
- L'utilisation des documents de maintenance.
- Les outils mis à leur disposition.
- Le diagnostic de panne.

Ils ont été enregistrés avec l'accord des personnes concernées, auxquelles l'anonymat a été garanti, puis ont ensuite été retranscrits *verbatim*.

En parallèle des entretiens, les différentes tâches exécutées au quotidien par les opérateurs ont été observées à l'aide d'une grille d'observation comprenant les éléments suivants : poste de travail, tâches réalisées, documents et outils utilisés associés, stratégies opératoires particulières et *verbatim* spontanés des

techniciens. L'utilisation du papier-crayon pour les observations est généralement mieux acceptée par les sujets et permet de relever des comportements plus naturels.

3. ANALYSE DES OBSERVATIONS

Pour analyser les observations, les grilles ont été regroupées et certains éléments récurrents ont été identifiés pour les trois entreprises :

- Une partie de la documentation utilisée par les opérateurs se trouve au format papier (documents de maintenance, rédaction de comptes rendus d'intervention). Ce format reste particulièrement apprécié par les techniciens pour le confort de lecture, le travail intellectuel, sa facilité d'utilisation et d'accès, et pour la prise d'annotation dans des cahiers personnels. De plus, les entreprises privilégient l'usage du papier pour s'assurer de la traçabilité de certains documents.
- Les outils (PC, smartphone ou tablette) et les logiciels *GMAO* (Gestion de maintenance assistée par ordinateur) mis à la disposition des utilisateurs ne sont pas suffisants pour gérer la multiplication des procédures et leur réglementation stricte.
- La traçabilité des interventions de maintenance est un point critique pour assurer un suivi et analyser les maintenances réalisées. Les opérateurs utilisent notamment leur smartphone professionnel pour prendre des photos de leurs interventions.
- De nombreuses communications ont été observées entre les opérateurs. Ces interactions se font le plus souvent par téléphone ou en face à face et ont principalement pour objectif de favoriser l'entraide et le retour d'expérience entre opérateurs novices et experts (échange de conseils et d'astuces, de documents techniques, etc.).

Concernant l'entreprise travaillant dans le domaine de la maintenance industrielle, des spécificités ont pu être observées. Tout d'abord, les environnements de travail et les équipements à maintenir sont particulièrement divers (en extérieur ou en intérieur, équipements sales, forte ou faible réglementation des sites...). De plus, les opérateurs ont souvent des difficultés pour se procurer les documents de maintenance fournis par les fournisseurs et les sous-traitants. Les échanges verbaux en interne ou avec du personnel externe sont donc très réguliers. Pour les deux autres entreprises du domaine aéronautique, leurs particularités résident dans la très forte réglementation des procédures de maintenance. De ce fait, la documentation proposée est particulièrement riche, mais les opérateurs éprouvent des difficultés pour s'y retrouver.

4. ANALYSE QUALITATIVE ET QUANTITATIVE DES 25 ENTRETIENS RETRANSCRITS VERBATIM

Les vingt-cinq entretiens retranscrits ont été analysés à l'aide du logiciel d'Analyse Cognitivo-Discursive (ACD) : Tropes¹ [10]. Ce logiciel, développé à la suite de nombreux travaux scientifiques issus de la psychologie cognitive et de la psycholinguistique est un outil classiquement utilisé en ergonomie pour analyser des verbalisations [18] [19] [20] [4]. Dans un premier temps, la combinaison des différents indicateurs langagiers (verbes, connecteurs, adverbes, etc.) a été analysée de manière à définir le style de chaque discours : 24 entretiens sont de style « argumentatif », ou « énonciatif », révélant ainsi l'implication du locuteur, et un seul entretien est de style « descriptif » indiquant que la personne ne s'est vraisemblablement pas impliquée dans son discours. Pour la suite de l'analyse, cet entretien ne sera donc pas pris en compte. Dans un second temps, un scénario d'analyse a été élaboré à partir de classifications fondées sur des dictionnaires comprenant des centaines de milliers de classifications sémantiques prédéfinies et obtenues automatiquement via le logiciel Tropes. La constitution de ce scénario permet d'intégrer le langage opératif des opérateurs de maintenance. À partir de ce scénario, 11 univers sémantiques « principaux » ont ainsi été définis à partir des 24 entretiens retenus (analyse pannes, besoins, communication externe, documents d'information, interactions en interne, outils, pannes équipements, planification, procédures qualité/sécurité, ressentis négatif et positif). Chaque univers est composé d'un ensemble d'« équivalents sémantiques » (regroupements de termes sémantiquement proches), qui seront ensuite dénombrés puis analysés. Ne seront présentés ici que les résultats concernant les 4 univers sémantiques : Communication externe, Documents d'information, Outils, Qualité/sécurité.

Pour ces 4 univers, le dénombrement des occurrences présenté sous la forme d'un tableau croisé, appelé également *tableau de contingence* (croisement de 2 variables catégorisées : les entreprises en ligne et les univers sémantiques retenus en colonne ; pour un exposé détaillé, voir [5]). Pour ce tableau de contingence, les occurrences des personnels de chaque entreprise ont été regroupées selon les thèmes évoqués, puis ramenées à une même échelle en effectuant les pourcentages en ligne (par rapport au total de chaque ligne-entreprise). Voir tableau 1 ci-après.

	Univers sémantiques	Communication externe	Documents Information	Outils	Qualité/ Sécurité
Entreprises	E1	19.66	32.38	37.00	10.96
	E2	4.57	38.48	31.10	25.85
	E3	14.58	40.10	27.60	17.71
	Moyenne	14.25	35.24	34.00	16.51

Tableau 1. Pourcentage d'occurrences produites par les personnels de chaque entreprise selon les univers sémantiques retenus (E1 : entreprise du domaine de la maintenance industrielle ; E2, E3 : entreprises du domaine de la maintenance aéronautique).

On peut constater que sur l'ensemble des occurrences produites par les personnels de l'entreprise E1, ce qui est le plus souvent évoqué est relatif aux outils (37 %), pour les entreprises E2 et

E3, il s'agit de la documentation (38 % et 40%). En moyenne, ce sont d'ailleurs les deux univers les plus évoqués par l'ensemble des personnels (respectivement 35 % et 34 %).

Afin de cerner les préoccupations des trois entreprises, le pourcentage de chaque case a ensuite été comparé à la moyenne. Les pourcentages en *sur-représentation*, indiquant une *attraction* entre les modalités des variables [5] sont indiqués en gras dans le tableau 1.

Ainsi, nous avons pu identifier que l'entreprise du domaine de la maintenance industrielle (E1) est plus axée sur la communication externe et les outils alors que les deux entreprises du domaine aéronautique (E2 et E3) semblent plus axées sur la documentation et la sécurité. Ces constats corroborent les observations effectuées sur le terrain puisque les opérateurs du domaine industriel rencontrent des difficultés concernant les systèmes à maintenir et l'utilisation d'outils pas suffisamment performants, ce qui les oblige à avoir recours à du personnel externe pour obtenir des informations sur le matériel à réparer. Quant aux opérateurs du domaine aéronautique, ils évoluent dans un univers où les procédures de sécurité sont primordiales. Ils sont donc très soucieux des documents fournis pour le respect des consignes.

5. SYNTHÈSE DES BESOINS IDENTIFIÉS

À l'aide de l'utilisation conjointe des observations et de l'analyse des entretiens, nous avons pu mettre en évidence qu'il existe deux grands modes de fonctionnement entre la maintenance industrielle et la maintenance aéronautique, chacun possédant ses propres caractéristiques, mais également des besoins communs. Parmi les besoins communs, l'accès à l'information doit être simplifié par l'intermédiaire d'une documentation dite « intelligente » qui doit être contextualisée aux situations opérationnelles et disponibles sous diverses formes (tableaux, graphiques, diagrammes, images/vidéos, textuelle, vocale...). La traçabilité des interventions de maintenance doit également être facilitée. Pour cela, les nouveaux outils proposés devront être capables de simplifier voire d'automatiser le transfert et la retranscription des comptes rendus d'interventions ainsi que la prise de photos. Il est également essentiel de fournir des outils d'aide à la décision pour davantage accompagner les opérateurs dans leurs tâches de maintenance tout en favorisant les communications entre opérateurs pour encourager le retour d'expérience.

Dans la suite, nous développons l'approche IHM décrivant les différents aspects de la maquette permettant de répondre aux besoins décrits précédemment par l'approche FH et proposons des pistes technologiques pour sa réalisation.

6. LA MULTIMODALITÉ POUR MIEUX S'ADAPTER

Selon la définition de Nigay *et al.* [13], « *La multimodalité est la capacité d'un système de communiquer avec un utilisateur selon différents canaux de communication et d'en extraire et d'en transmettre le sens.* »

¹ <https://www.tropes.fr/>

L'étude met en relief l'usage récurrent du papier et du stylo dans les organisations des entreprises, que ce soit pour la traçabilité, le remplissage de rapports, de formulaires, ou pour l'annotation de documentation (personnelle ou non). Lors de l'étude, les opérateurs ont aussi fait part de l'utilisation régulière d'appareils mobiles comme les tablettes ou les smartphones. Ils sont principalement utilisés pour capturer des photos, vidéos ou sons, pour appeler un collègue pour de l'aide et pour consulter de la documentation. Ces deux activités se font en plus des opérations réelles de maintenance. L'activité des opérateurs est donc déjà multimodale.

Cependant, cette multimodalité n'est pas unifiée de par la nature même des différents outils manipulés. Pour exemple, il est difficile de joindre à un document papier rempli au stylo une photo prise avec un smartphone. S'affranchir du papier pour migrer vers le "tout numérique" permettrait une telle unification ; mais pour garantir une bonne intégration à l'organisation actuelle et conserver les avantages indéniables du papier, notre maquette se doit de combiner les deux formats, papier et numérique en conservant l'usage d'un appareil mobile ainsi que l'utilisation du stylo et du papier comme moyen d'interaction. Nous basons donc notre système sur l'usage du papier en conjonction avec un mobile, grâce à l'usage d'un stylo numérique lié via *Bluetooth*, à une tablette ou un smartphone. Afin d'ouvrir le champ des possibles et permettre une visualisation contextualisée et main-libre de l'information, nous intégrons à ce système un casque de réalité augmentée.

Grâce au stylo numérique, les informations écrites sur le papier par le stylo sont converties numériquement, permettant d'avoir une copie numérique du document papier. Grâce à cela, il devient possible de lier une photo ou une vidéo à un formulaire (i.e à sa copie numérique). Par extension, l'annotation de documentation peut aussi être sauvegardée et enrichie de la même manière sans que cela change les habitudes de travail des opérateurs. La tablette ou le smartphone, en plus de sauvegarder et traiter les données du stylo, continue de servir d'outil de capture et de communication. Nous développons dans la suite l'utilisation de la réalité augmentée dans le contexte de la maintenance industrielle.

7. LA RÉALITÉ AUGMENTÉE POUR ACCOMPAGNER

La réalité augmentée au service de l'industrie a été étudiée dès les prémises technologiques et montrait déjà un fort potentiel d'amélioration des processus industriels. Azuma présentait en 1997 un état de l'art sur la réalité augmentée [2]. Il y affirme que la réalité augmentée faciliterait l'apprentissage et la réalisation de tâches complexes plus rapidement et avec moins d'erreurs. Ceci grâce au fait que la réalité augmentée permette d'assister l'opérateur en temps réel avec des contenus interactifs et adaptés au contexte. Par exemple, afficher le modèle CAO de l'objet à réparer [16], une fiche technique [7] ou montrer l'animation de la tâche à effectuer [21] [6]. Cette affirmation a été confirmée par plusieurs études passées [17] [12] [9] [14]. Ces dernières confortent l'intuition que la réalité augmentée permet un meilleur accompagnement de l'opérateur depuis sa formation

aux tâches opérationnelles en mettant facilement à disposition la documentation nécessaire. Cette facilitation de consultation de documents est un besoin identifié par l'étude ergonomique présentée précédemment. La réalité augmentée semble donc être un bon candidat pour répondre à ce besoin.

En plus de l'affichage de données contextuelles et interactives, la réalité augmentée permet une communication mains libres entre opérateurs et experts plus adaptée aux conditions de travail. Nous avons vu précédemment que les opérateurs communiquent beaucoup entre eux en échangeant des fichiers multimédias ou oralement. Cette collaboration entre expert et opérateur peut être améliorée de plusieurs façons grâce à la réalité augmentée. Tout d'abord en permettant à l'expert de voir en direct le site sur lequel l'opérateur se trouve grâce à la vidéo [3] [22] [11] ou à la réalité virtuelle [15]. Ensuite en permettant à l'expert de montrer directement à l'opérateur et de façon interactive des pièces ou des actions à réaliser grâce au dessin [11] ou aux gestes [22] [15] [1].

Nous voyons donc que la réalité augmentée présente plusieurs caractéristiques permettant de répondre aux besoins exprimés et recueillis par l'étude. La suite de l'article fait une revue des possibilités technologiques actuelles qui permettent la mise en place d'un système multimodal papier/stylo numérique/RA pour l'aide à la maintenance.

8. TECHNOLOGIES ET LEVIERS D'INNOVATION

La maquette, qui répondra aux besoins préliminaires identifiés des opérateurs, sera basée sur l'utilisation d'un stylo numérique lié via *Bluetooth*, à une tablette ou un smartphone, et d'un casque de réalité augmentée. Le lecteur notera que l'objectif est ici de pouvoir tester la viabilité des fonctionnalités proposées, et non les systèmes technologiques en eux-mêmes ou les impacts physiologiques qui leur sont associés. Dans un premier temps, nous présentons de façon non exhaustive différentes technologies permettant de recueillir ce que l'opérateur écrit (i.e. stylos numériques et associés). Puis dans un deuxième temps nous discutons l'adéquation avec le projet d'une sélection de casques de réalité augmentée.

8.1 Numérisation de l'écriture

Il existe plusieurs technologies permettant de numériser en temps réel des écrits. Le *Livescribe 3 d'Anoto*² est sûrement le plus connu. Ce stylo numérique est composé d'un stylo classique et d'une caméra qui filme ce qui est écrit sur un papier à motifs pré-imprimés. Le motif du papier permet de localiser sur quelle feuille et où sur la feuille l'écriture a été faite. Le *Smartpen N2 de Neolab*³ repose sur la même technologie, mais le motif pré-imprimé n'est pas le même. Les stylos doivent juste être appariés à un smartphone ou une tablette pour envoyer les écrits numérisés. Ces écrits sont après consultables sur l'application dédiée.

*L'Equil Smartpen 2*⁴ propose d'utiliser un récepteur placé en haut d'une feuille A4 quelconque pour enregistrer ce que

² <https://www.livescribe.com/en-us/smartpen/ls3/>

³ <https://www.neosmartpen.com/en/neosmartpen/>

⁴ <https://www.myequil.com/fr/smartpen2-fr/>

l'utilisateur écrit. Cependant, il n'est pas possible d'automatiquement associer une feuille papier à un document. L'utilisateur doit le faire manuellement depuis l'application dédiée sur le smartphone.

*Bamboo Smartpad de Wacom*⁵ est une solution composée d'une tablette graphique sur laquelle une feuille peut être posée. Les mouvements du stylo sont donc enregistrés de la même façon qu'avec une tablette graphique classique et envoyés à l'application sur smartphone. Cependant, cette technologie ne permet pas l'identification de la feuille sur laquelle on écrit ni la possibilité d'utiliser un bloc note.

Nous retenons principalement le *Livescribe 3 d'Anoto* et le *Smartpen N2 de Neolab* pour l'identification de la feuille et la possibilité d'utiliser un bloc note.

8.2 Les casques de réalité augmentée

Il existe plusieurs solutions pour les casques de réalité augmentée. Afin de pouvoir se rapprocher des usages de la documentation par les opérateurs, la maquette proposée devra rendre possibles la disposition et la manipulation de documents dans l'espace. Pour se faire, la stéréovision et l'interaction gestuelle doivent être possibles via les lunettes de réalité augmentée. Ainsi, les lunettes monoculaires ne permettant pas la stéréovision par nature sont écartées de la sélection.

Concernant les solutions binoculaires, les *ODG R9*⁶ sont intéressantes pour la multitude de capteurs embarqués (altimètre, lumière ambiante, capteur d'humidité, caméra *Full HD 120 FPS*), pour son suivi environnemental et en position. Pour le moment, le *SDK* n'est pas disponible rendant l'intégration des *R9* à la maquette impossible.

Le casque *Meta 2*⁷ a comme caractéristique principale qu'il offre un champ de vision de 90 degrés. Mais il ne permet pas de suivi environnemental (e.g. pas de détection des murs), et son point faible est qu'il doit être relié à un ordinateur, ce qui compromet la mobilité de la maquette.

Les lunettes de chez *DAQRI*⁸ disposent aussi de fonctionnalités intéressantes. Notamment un poids limité de 335g et une unité de calcul séparée à porter à la ceinture entièrement dédiée au suivi en position et environnemental. Bien qu'équipée d'une caméra de profondeur, l'interaction gestuelle n'est pas disponible et doit se faire uniquement via la position de la tête pour viser et un temps d'attente pour sélectionner.

Finalement, les *Hololens de Microsoft*⁹ semblent être les meilleures candidates pour la maquette. Elles offrent le suivi en position et environnemental, l'interaction gestuelle, et sont complètement portables. Les inconvénients majeurs étant leur poids (575 g) et leur champ de vision réduit (35 degrés).

9. CONCLUSION

Cette étude montre l'importance de l'approche conjointe FH et IHM. En effet, grâce à l'approche ergonomique centrée sur les usages, les analyses ont permis de déterminer les besoins des opérateurs de maintenance. À savoir, proposer l'accès à une documentation contextualisée, diverse et évolutive, optimiser le

suivi et la traçabilité des interventions et favoriser les communications entre opérateurs ou experts. L'étude a également révélé que les opérateurs apprécient et favorisent dans certains cas l'usage de la documentation papier. Ce dernier point, non identifié lors de l'élaboration du projet, a abouti à l'intégration dans la maquette, du stylo numérique en plus de la tablette ou du smartphone et du casque de réalité augmentée. Par ailleurs, la multimodalité du système proposé permet de mieux s'adapter aux environnements divers et à la multitude des procédures actuelles. La réalité augmentée apporte notamment de nouvelles perspectives concernant la consultation de documentation et la communication entre opérateurs. Cette maquette, une fois implémentée, devra être testée avec les utilisateurs finaux pour être validée. Les évaluations permettront notamment d'analyser l'utilisabilité et l'intuitivité du dispositif ainsi que son efficacité en milieu contraint. Une attention particulière devra être portée vis-à-vis des potentielles réticences des utilisateurs face à ces technologies avancées.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement l'ensemble des partenaires du projet ainsi que les opérateurs de maintenance interviewés pour leur collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

1. Amores, J., Benavides, X. et Maes, P., ShowMe : A Remote Collaboration System That Supports Immersive Gestural Communication, *Proc. Ext. Abstracts CHI 2015*, 2015.
2. Azuma, R. T. A Survey of Augmented Reality, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, pp. 355-385, 1997.
3. Bottecchia, S., Cieutat, J.-M. et Jessel, J.-P., T.A.C: augmented reality system for collaborative tele-assistance in the field of maintenance through internet, *Proc. AH 2010*, 2010.
4. Caid, S., Hauret, D., Wolff, M. et Mollard, R., Fatigue study and discourse analysis of French Uninhabited Aerial Vehicle (UAV) operators to understand operational issues, *Proc. ErgoIA*, 2016.
5. Corroyer, D. and Wolff, M., L'analyse statistique des données en Psychologie : concepts et méthodes de base, A. Colin, 2003.
6. Crescenzo, F. D., Fantini, M., Persiani, F., Stefano, L. D., Azzari, P. et Salti, S., Augmented Reality for Aircraft Maintenance Training and Operations Support, *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 31, pp. 96-101, 1 2011.
7. Engelke, T., Keil, J., Rojtberg, P., Wientapper, F., Webel, S. et Bockholt, U., Content first - A concept for industrial augmented reality maintenance applications using mobile devices, *Proc. ISMAR 2013*, 2013.
8. Fenneteau, H. Enquête : entretien et questionnaire, Dunod, 2015.

⁵ <https://www.wacom.com/en-nl/products/smartpads>

⁶ <https://www.osterhoutgroup.com/r-9-smartglasses>

⁷ <http://www.metavision.com/>

⁸ <https://daqri.com/products/smart-glasses/>

⁹ <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens>

9. Funk, M., Bächler, A., Bächler, L., Kosch, T., Heidenreich, T. et Schmidt, A., Working with Augmented Reality?: A Long-Term Analysis of In-Situ Instructions at the Assembly Workplace, *Proc. PETRA 2017*, 2017.
10. Ghiglione, R., Molette, P., Landré, A. and Bromberg, M., L'analyse automatique des contenus, Dunod, 1998.
11. Gurevich, P., Lanir, J., Cohen, B. et Stone, R., TeleAdvisor : A Versatile Augmented Reality Tool for Remote Assistance, *Proc. CHI 2012*, 2012.
12. Henderson, S. et Feiner, S. , Exploring the benefits of augmented reality documentation for maintenance and repair, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 17, pp. 1355-1368, 2011.
13. Nigay, L. et Coutaz, J., A Design Space for Multimodal Systems: Concurrent Processing and Data Fusion, *Proc. INTERACT '93 and CHI '93*, 1993.
14. Sanna, A., Manuri, F., Lamberti, F., Paravati, G. et Pezzolla, P., Using handheld devices to support augmented reality-based maintenance and assembly tasks, *Proc. ICCE 2015*, 2015.
15. Tecchia, F., Alem, L. et Huang, W., 3D Helping Hands : A Gesture Based MR System for Remote Collaboration, *Proc. VRCAI 2012*, 2012.
16. Wang, T., Liu, Y. et Wang, Y., Infrared Marker Based Augmented Reality System for Equipment Maintenance, *Proc. CSSE 2008*, 2008.
17. Webel, S. , Bockholt, U. , Engelke, T. , Gavish, N. , Olbrich, M. , Preusche, C. , Webel, S. , Bockholt, U. , Engelke, T. , Gavish, N. , Olbrich, M. et Preusche, C. , An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 61, pp. 398-403, 2013.
18. Wolff, M., Burkhardt, J. M. et de la Garza, C., Analyse exploratoire de "points de vue" : une contribution pour outiller les processus de conception, *Le travail humain*, vol. 68, pp. 253-286, 2005.
19. Wolff, M., Burkhardt, J.M. et Visser, W., Analyse multifactorielle des verbalisations en ergonomie : validité et richesse des interprétations. Deuxièmes journées d'étude en psychologie ergonomique, *Proc. Epique*, 2003.
20. Wolff, M., Leroy, B., Peschaud, F. et Mollard, R., Transformation du travail et accompagnement ergonomique : l'exemple de la restructuration des bureaux de poste, *Proc. ErgoIA*, 2010.
21. Yuan, M. L., Ong, S. K. et Nee, A. Y. C., Augmented reality for assembly guidance using a virtual interactive tool, *International Journal of Production Research*, vol. 46, pp. 1745-1767, 2008.
22. Zenati, N., Bellarbi, A., Benbelkacem, S. et Belhocine, M., Augmented reality system based on hand gestures for remote maintenance, *Proc. Proc. ICMCS 2014*, 2014.