



HAL
open science

Manuel de maintenance intelligent en Réalité Augmentée : Application à l'inspection de pièces de structure

Gregoire Mompeu

► **To cite this version:**

Gregoire Mompeu. Manuel de maintenance intelligent en Réalité Augmentée : Application à l'inspection de pièces de structure. Automatique / Robotique. HESAM Université, 2023. Français. NNT : 2023HESAE045 . tel-04503249

HAL Id: tel-04503249

<https://pastel.hal.science/tel-04503249v1>

Submitted on 13 Mar 2024

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

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

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques (LISPEN)
EA7515 – Campus de Cluny – Institut de Chalon-sur-Saône

THÈSE

présentée par : **Grégoire MOMPEU**

soutenue le : **12 juillet 2023**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Industriel**

Manuel de maintenance adaptatif en Réalité Augmentée : Application à l'inspection de pièces de structure

THÈSE dirigée par :
Pr MERIENNE Frédéric

et co-encadrée par :
Dr DANGLADE Florence et Dr GUILLET Christophe

Jury

M. Jean-François BOUJUT Professeur des Universités, G-SCOP – UMR 5272, Grenoble INP	Président
Mme Indira THOUVENIN , Professeur des Universités, Heudiasyc – UMR 7253, UTC	Rapportrice
M. Damien TRENTESAUX , Professeur des Universités, LAMIH – UMR 8201, UPHF	Rapporteur
M. Frédéric MERIENNE , Professeur des Universités, LISPEN – EA7515, ENSAM	Examinateur
Mme Florence DANGLADE , Maître de Conférences, LISPEN – EA7515, ENSAM	Examinatrice
M. Christophe GUILLET , Maître de Conférences, LISPEN – EA7515, ENSAM	Examinateur
M. Francis ROSSIGNOL , VP Smart Factory, Safran Landing Systems	Invité

À ma famille, ma bien-aimée et mes amis
qui m'ont soutenu durant ces trois années.

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes ayant contribué aux travaux présentés dans ce manuscrit, et qui m'ont apporté leur aide et leur expertise durant ces trois années.

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants, Frédéric Merienne, Florence Dangle et Christophe Guillet pour leur soutien et leur bienveillance. Ils ont toujours su se montrer la voie à suivre tout en me laissant beaucoup d'autonomie dans mon approche. Je remercie également Francis Rossignol de Safran Landing Systems qui m'a incité à toujours donner le meilleur de moi-même et dont les conseils m'ont beaucoup apporté. Je tiens aussi à remercier Florian Fraisse et Quentin Loizeau pour leur enthousiasme et tous ces bons moments que nous avons partagés. Merci aussi à Jonathan Virot qui m'a accompagné tout au long de cette aventure.

Je remercie également toutes les personnes de Safran Landing Systems que j'ai pu rencontrer durant ces trois années. Parmi elles je tiens tout particulièrement à remercier Antoine Guidoux et Germain Forgeoux à Gloucester, Dean Smith et Patrick Hanslow du site MRO de Gloucester, Mickaël Grasser de Molsheim et Pierre Ravanne à Vélizy. Merci aussi aux équipes de Safran Tech et de Safran Composites pour leur accueil et le partage de leur expertise des technologies de contrôle non destructif.

Je souhaite aussi remercier l'équipe Tech Pub de m'avoir accueilli et avec qui ce fut un plaisir d'échanger durant les pauses.

Toutes ces rencontres furent un réel plaisir pour moi et m'ont beaucoup apporté aussi bien sur le plan personnel que professionnel. Je souhaite sincèrement pouvoir au nouveau croiser leur route à l'avenir.

Une fois de plus, merci à tous !

Résumé

Ce sujet de thèse de doctorat se situe dans le domaine de la réalité augmentée pour l'assistance à la maintenance sur des pièces de structure d'équipements aéronautique. Le projet a pour cadre une collaboration entre les Arts et Métiers au travers du laboratoire LISPEN et le groupe SAFRAN. Le groupe SAFRAN est engagé dans une stratégie de développement d'outils numériques dans le but d'apporter de nouveaux services aux compagnies aériennes et aux acteurs de la MRO « Maintenance, Repair and Overhaul ». Ce projet s'inscrit dans cette démarche, l'objectif principal étant de proposer une aide aux opérations de maintenance personnalisée par l'utilisation de technologies de réalité augmentée.

Les différents travaux menés dans le cadre de cette activité de recherche doivent donc permettre de proposer une méthodologie destinée à la conception de systèmes de réalité augmentée adaptative permettant d'assister au mieux les opérateurs lors d'opérations de maintenance et de diagnostic de pièces de structure. Un tel système doit bien être capable de fournir une quantité d'informations proportionnée en fonction de l'expertise de chacun. Cette façon de procéder pourrait ainsi permettre à la fois d'améliorer les performances des opérateurs lors de l'exécution des opérations de maintenances mais aussi d'améliorer l'acceptabilité des opérateurs concernant l'introduction de ce genre de système d'assistance. Bien que ce genre de système commence à émerger dans la littérature, leur impact sur la charge cognitive des opérateurs comparé à des systèmes d'assistance non-adaptative en réalité augmentée reste mal connu. De plus, sans cadre théorique commun, la diversité des propositions présentées dans la littérature empêche de comparer les résultats entre différentes études. C'est pourquoi nous proposons une méthodologie destinée à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée. Les expérimentations menées sur la base de cette méthodologie montrent que l'utilisation de systèmes d'assistance adaptative permettent de mieux répondre aux besoins d'opérateurs ayant des niveaux d'expertise différents. D'autres résultats indiquent toutefois que dans certaines conditions, la mauvaise gestion de l'adaptation des contenus et de l'expérience globale délivrée par le système peut conduire à une hausse de la charge cognitive. Cet effet peut cependant être modulé en ajustant soigneusement la stratégie d'adaptation selon le cas d'usage rencontré.

Mots clés : Réalité augmentée, Maintenance, Assistance adaptative

Résumé en anglais

This doctoral thesis topic is in the field of augmented reality (AR) for aeronautical maintenance. The project is part of a collaboration between the Arts et Métiers institute of technology and the SAFRAN group. The SAFRAN group is engaged in a strategy of developing digital tools to provide new services to airlines and MRO "Maintenance, repair and overhaul" actors. This project is part of this approach; the main objective is to provide custom support for aeronautical maintenance with augmented reality technologies. In the end, the study will have to propose a system based on augmented reality technology that will assist operators on maintenance and diagnosis operations on structural parts. Although this type of system already exists in the literature, their impact on operators' cognitive load compared to standardize augmented reality assistance systems remains poorly understood. Moreover, without a common theoretical framework, the diversity of proposals presented in the literature prevents the comparison of results between different studies. This is why we propose a framework for the modelling, the design, and the execution of adaptive assistance systems in augmented reality. The experiments built on this methodology and carried out during this research project demonstrate that the use of the adaptive assistance system can, under certain conditions, lead to an increase in cognitive load. However, the results also show that this increase can be reduced by modifying the adaptation strategy that drive the presentation of information to the operator.

Keywords: Augmented reality, Maintenance, Adaptive assistance

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	4
Résumé en anglais	5
Table des matières	6
Liste des tableaux	10
Liste des figures	11
Liste des annexes.....	14
Glossaire.....	15
Introduction	16
Contexte industriel	17
Contexte scientifique.....	19
Structure du manuscrit	21
Première partie Contexte et Etat de l’Art	22
1. Contexte et état de l’art	23
1.1. Industrie 4.0.....	23
1.2. Réalité Augmentée	26
1.2.1. Historique	26
1.2.2. Principes de fonctionnement	28
1.2.3. Systèmes de réalité augmentée.....	29
1.2.4. Création et édition des contenus de réalité augmentée	36
1.2.5. La réalité augmentée dans l’industrie.....	38
1.2.6. Applications de la réalité augmentée dans la maintenance industrielle	41
1.2.7. Bénéfices de la réalité augmentée pour la maintenance industrielle.....	42
1.2.8. Synthèse	44
1.3. Maintenance Aéronautique	45
1.3.1. Environnement industriel aéronautique	45

1.3.2.	Cycle de vie d'un équipement aéronautique	46
1.3.3.	Activités de maintenance	47
1.3.4.	Documentation technique.....	49
1.3.5.	Enjeux de la maintenance aéronautique	51
1.4.	Réalité augmentée adaptative.....	52
1.4.1.	Limites des solutions d'assistance en réalité augmentée standardisées	52
1.4.2.	Engagement de l'utilisateur envers le système d'assistance et la tâche.....	54
1.4.3.	Propositions de solutions dans la littérature.....	55
1.4.4.	Synthèse	57
Deuxième partie Problématiques et approche globale		61
2.	Problématiques et approche globale.....	62
2.1.	Introduction	62
2.2.	Problématiques et questions de recherche.....	65
Troisième partie Méthodologie pour la modélisation, conception, et l'exécution d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée		69
3.	Méthodologie pour la modélisation, la conception et l'exécution d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée	70
3.1.	Vue d'ensemble.....	70
3.2.	Modélisation théorique.....	72
3.2.1.	Opérations de maintenance	72
3.2.2.	Environnement de maintenance	73
3.2.3.	Caractéristiques de l'opérateur.....	76
3.2.4.	Inventaire des éléments ajustables de l'assistance	78
3.2.5.	Mesures et évaluation des caractéristiques de l'opérateur	84
3.3.	Conception du ARAAS.....	94

3.3.1.	Description de l'opération de maintenance cible	94
3.3.2.	Sélection des éléments ajustables.....	95
3.3.3.	Sélection des indicateurs disponibles.....	97
3.3.4.	Conception d'une stratégie d'adaptation.....	99
3.4.	Exécution du ARAAS	101
3.5.	Synthèse de la proposition.....	102
Quatrième partie Expérimentations et résultats		105
4.	Expérimentations et résultats	106
4.1.	Introduction	106
4.1.1.	Objectifs	106
4.1.2.	Rappel des questions de recherche.....	106
4.1.3.	Approche expérimentale	107
4.2.	Pré-étude en contexte industriel	109
4.2.1.	Introduction	109
4.2.2.	Cas d'usage et contexte	111
4.2.3.	Conception du ARAAS	112
4.2.4.	Retour des opérateurs	117
4.3.	Evaluation de l'impact de l'adaptation des contenus	118
4.3.1.	Introduction	118
4.3.2.	Support expérimental	118
4.3.3.	Protocole expérimental.....	123
4.3.4.	Résultats	124
4.4.	Comparaison de différentes stratégies d'adaptation.....	127
4.4.1.	Introduction	127

4.4.2.	Support expérimental	128
4.4.3.	Protocole expérimental.....	131
4.4.4.	Résultats	132
4.5.	Déclinaison de la méthodologie sur d'autres cas d'usage.....	136
4.5.1.	Introduction	136
4.5.2.	Contexte industriel	136
4.5.3.	Bilan des activités d'assistance en réalité augmentée	140
4.5.4.	Synthèse	141
	Conclusion.....	142
	Synthèse des travaux	143
	Perspectives	145
	Valorisation scientifique des travaux	147
	Bibliographie.....	148
	Annexes	159
	Annexe 1 : Questionnaire NASA-TLX.....	160
	Annexe 2 : Questionnaire SUS.....	161
	Résumé.....	162
	Résumé en anglais.....	163

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemples d'opérations de maintenance et de leurs composants	73
Tableau 2 : Caractéristiques des éléments de l'environnement de maintenance ayant un impact sur l'assistance en réalité augmentée	74
Tableau 3 : Bandes analyse fréquentielles de l'EEG	89
Tableau 4 : Correspondance entre l'évolution des indicateurs physiologiques et l'évolution de la charge cognitive	91
Tableau 5 : Guide pour l'évaluation des niveaux des caractéristiques impactant le choix des indicateurs	95
Tableau 6 : Eléments ajustables impactés par les caractéristiques de l'opération	96
Tableau 7 : Facteurs d'impact des caractéristiques de l'environnement de maintenance sur la faisabilité de la mise en œuvre du suivi des activités physiologiques servant à évaluer la charge cognitive	98
Tableau 8 : Organisation des sections et des questions adressées.....	108
Tableau 9 : Caractéristiques des tâches du cas d'usage	113
Tableau 10 : Evaluation des contraintes du cas d'usage pour la sélection des indicateurs	115
Tableau 11 : Retour des opérateurs après essai des deux conditions d'assistance	117
Tableau 12 : Distribution des participants dans les différents groupes et sous-groupes.....	132
Tableau 13 : Informations transmises à l'opérateur par le système RA	139
Tableau 14 : Composants des systèmes d'assistance adaptative utilisés pour le masquage peinture et l'inspection préliminaire	140
Tableau 15 : Activités de réalité augmentée chez Safran Landing Systems	141

Liste des figures

Figure 1 : Framework XReality proposé par Rauschnabel et al. [4].....	24
Figure 2 : (a) Dispositif présenté par Sutherland [5] (b) et (c) Représentations 3D visualisées via le dispositif	26
Figure 3 : Dispositif de réalité augmentée type.....	30
Figure 4 : Exemple d'application industrielle de réalité augmentée sur tablette.....	30
Figure 5 : Gestion des flux d'informations visuelles pour smartphones / tablettes / stations fixes ou mobiles / HMD <i>video-see-through</i>	31
Figure 6 : Exemple d'application industrielle de réalité augmentée sur station fixe.....	32
Figure 7 : Gestion des flux d'informations visuelles pour projecteur.....	32
Figure 8 : Exemple de système projectif.....	33
Figure 9 : Gestion des flux d'informations visuelles pour HMD <i>optical-see-through</i>	34
Figure 10 : (a) Visiocasque <i>optical-see-through</i> (Hololens 2) (b) Visiocasque <i>video-see-through</i> (Varjo XR-3).....	35
Figure 11 : Représentation 3D en surfacique (à gauche) et en polygonal (à droite).....	37
Figure 12 : Répartition des bénéfices apportés (à gauche) et défis identifiés (à droite) pour l'utilisation de la réalité augmentée en environnement de production [25].....	40
Figure 13 : Classification des besoins d'assistance et de formation proposée par Moghaddam et al. [33]	44
Figure 14 : Acteurs de l'industrie aéronautique.....	46
Figure 15 : Cycle de vie d'un équipement aéronautique	47

Figure 16 : Flux des opérations dans l'atelier de maintenance	49
Figure 17 : Distinction entre connaissances et compétences	63
Figure 18 : Vue d'ensemble de la méthodologie pour la modélisation, la conception et l'exécution d'un système d'assistance adaptative de réalité augmentée pour les opérations de maintenance	71
Figure 19 : Décomposition d'une opération de maintenance basée sur la hiérarchie décrite par Dunston et Wang [60]	72
Figure 20 : Ontologie de l'environnement de maintenance assisté	78
Figure 21 : Cycle cardiaque type [74]	87
Figure 22 : Exemple de signal ERP [76]	89
Figure 23 : Inventaire des indicateurs permettant d'évaluer des caractéristiques de l'opérateur	93
Figure 24 : Exemple de relations existantes au sein d'une stratégie d'adaptation	101
Figure 25 : Pipeline logiciel utilisé dans le développement d'applications de réalité augmentée industrielle	110
Figure 26 : Train d'atterrissage principal A320 et ses deux pièces de structure	111
Figure 27 : Train d'atterrissage à l'arrivée au centre de maintenance (MRO)	112
Figure 28 : Aperçu des deux conditions d'assistance à l'inspection	114
Figure 29 : Essai en atelier (vue d'une des étapes du scénario séquentiel)	114
Figure 30 : Stratégie d'adaptation	116
Figure 31 : Eléments ajustables de l'application (vue virtuelle de la phase d'inspection)	120
Figure 32 : Les deux types d'interface proposés au sein de l'application	121

Figure 33 : Liens entre les éléments ajustables et les indicateurs évaluant les paramètres de l'utilisateur	122
Figure 34 : Déroulé détaillé pour les deux groupes	123
Figure 35 : Evaluation subjective de la charge cognitive (résultats du questionnaire NASA-TLX).....	125
Figure 36 : Evaluation de l'expérience utilisateur (scores attribués par les participants via le questionnaire SUS).....	125
Figure 37 : Vue d'ensemble de l'application d'assistance en réalité augmentée.....	128
Figure 38 : Stratégie d'adaptation A (flexibilité faible).....	129
Figure 39 : Stratégie d'adaptation B (flexibilité renforcée).....	130
Figure 40 : Protocole expérimental	132
Figure 41 : Résultats du NASA-TLX obtenus pour chacun des groupes et sous-groupes.....	134
Figure 42 : Cas d'usage bénéficiant de l'assistance adaptative.....	136

Liste des annexes

Annexe 1 : Questionnaire NASA-TLX.....	160
Annexe 2 : Questionnaire SUS.....	161

Glossaire

CMM	Component Maintenance Manual
CND	Contrôle Non Destructif
KPI	Key Performance Indicator
MRO	Maintenance Repair and Overhaul
OEM	Original Equipment Manufacturer
P/N	Part Number
RA	Réalité Augmentée
S/N	Serial Number
SB	Service Bulletin
SUS	System Usability Scale
TLX	Task Load Index

Introduction

Contexte industriel

Les travaux présentés dans ce manuscrit traitent de la conception et la mise en place de systèmes d'assistance adaptative de réalité augmentée dans le cadre des opérations de maintenance industrielle. L'assistance aux opérations de maintenance fournie par ce genre de système doit être en mesure de s'adapter en fonction du niveau d'expertise et des préférences de travail des opérateurs. Ces travaux de recherches ont été effectués dans le cadre d'un partenariat entre la société Safran Landing Systems, faisant partie du groupe Safran, et l'institut Image faisant partie du LISPEN (Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Physiques et Numériques), un des pôles de recherche des Arts et Métiers.

Cette initiative s'inscrit dans une démarche d'amélioration des processus du groupe Safran, acteur majeur de l'industrie aéronautique. Dans un contexte de compétitivité accrue et afin de conserver son rang de leader sur le marché des équipements aéronautiques, Safran cherche à tirer parti de l'usage des nouvelles technologies du numérique pour améliorer à la fois les performances et la fiabilité de ses processus et de ses produits. Parmi, ces technologies, la réalité augmentée a été identifiée comme un levier important pour rendre les procédures de maintenance plus facile à interpréter par les opérateurs.

La pandémie de COVID-19 avait fortement impacté l'expansion de la circulation aérienne et avait donc ralenti, par la même occasion, la croissance du secteur aéronautique, pourtant en très forte progression jusqu'en 2019. Cependant, on observe aujourd'hui une très forte reprise dans le secteur. La demande se fait à la fois plus forte sur les cadences de production de nouveaux équipements aéronautiques mais également sur la maintenance des équipements déjà en service. De plus, les opérations de maintenance requièrent une expertise souvent difficile à acquérir. La montée en compétences des opérateurs peut ainsi s'étaler sur plusieurs mois voire plusieurs années pour les opérations présentant le plus de variabilité au niveaux des cas rencontrés. Dans un contexte de renouvellement des équipes à la suite du départ des plus anciens, les enjeux autour de la transmission du savoir se retrouvent donc décuplés.

Enfin, il est important de noter que, dans le cadre de la maintenance aéronautique, le niveau de complexité et la variabilité des opérations effectuées sont tels, que même les opérateurs

considérés comme des experts sont régulièrement amenés à consulter une documentation technique dense. En effet, les contraintes en matière de sécurité étant particulièrement importantes dans le secteur aéronautique, ces documents techniques doivent donc répondre à des normes très strictes quant à l'exhaustivité et la clarté des informations qu'ils fournissent. Par conséquent les manuels de maintenance des équipements aéronautiques sont des documents de plusieurs centaines voire milliers de pages rédigées dans un anglais technique. Bien que la rédaction de ces manuels se tourne aujourd'hui vers des formats numériques censés faciliter leur mise à jour et leur exploitation, ils restent majoritairement diffusés sous le format PDF et sont même encore souvent utilisés au format papier une fois imprimés, ce qui complique la recherche d'informations pour les opérateurs. Face à ce constat, la réalité augmentée s'est donc imposée comme un moyen de faciliter l'exploitation des données autrefois cantonnées dans ces manuels de maintenance.

Contexte scientifique

Les travaux de recherches menés dans le domaine de la réalité augmentée appliquée à l'assistance des opérations de maintenance industrielles sont nombreux et permettent aujourd'hui de mieux comprendre l'apport et les limites de cette technologie en comparaison des instructions de travail habituelles (support papier, gammes numériques). Ainsi, les performances atteintes par les opérateurs assistés par la réalité augmentée sont, dans la plupart des cas, significativement améliorées par rapport aux opérateurs suivant des instructions conventionnelles. Le temps d'exécution et le taux d'erreurs produites lors des opérations se retrouvent réduits lorsque les opérateurs bénéficient du support de la réalité augmentée. La charge cognitive des opérateurs est également allégée en contextualisant la présentation des informations et en minimisant ainsi leur recherche dans divers documents.

Toutefois, l'apport bénéfique de la réalité augmentée dans l'assistance des opérations de maintenance n'est pas systématique. Outre l'importance d'évaluer le niveau de complexité des tâches devant être pris en compte pour estimer correctement les bénéfices potentiels de la technologie, l'application de procédures d'assistance standardisées semble également montrer des limites. En effet, le niveau d'expertise des opérateurs peut être relativement variable si l'on considère la longue courbe d'apprentissage par laquelle ces derniers doivent passer mais également la flexibilité toujours plus importante exigée par le besoin de personnalisation des produits formulé par les clients. Dans ce contexte, l'utilisation de la réalité augmentée peut parfois même représenter un obstacle à la progression de l'opérateur si l'expérience d'assistance n'a pas été pensée pour son niveau d'expertise ou sa façon de travailler.

C'est pourquoi une partie de la recherche concernant la réalité augmentée s'intensifie autour des problématiques liées à l'adaptation et la personnalisation des contenus en fonction des besoins et exigences de chacun. Bien que la recherche dans ce domaine soit aujourd'hui particulièrement active, il semble qu'aucune formalisation de la définition et de la conception de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée, et généralisable pour l'ensemble des opérations de maintenance, n'ait été développée afin d'explorer plus largement les bénéfices

pouvant être apportés par l'introduction d'une adaptation des contenus en fonction de l'expertise et des préférences de travail des opérateurs.

Les travaux présentés dans cette thèse proposent donc une méthodologie permettant de définir notions et les concepts nécessaires à la création de systèmes de réalité augmentée capables d'ajuster leur contenu et leurs interfaces pour faciliter encore davantage le travail des opérateurs de maintenance, quel que soit leur niveau d'expertise ou leurs méthodes de travail. L'objectif de la mise en œuvre de cette méthodologie sera alors d'évaluer l'apport de l'introduction de cette notion d'adaptation au sein des systèmes d'assistance en réalité augmentée.

Structure du manuscrit

Le déroulé du présent manuscrit s'articule autour de quatre parties allant de l'introduction des concepts fondamentaux de la réalité augmentée jusqu'au résultats relatifs à la conception et la mise en œuvre de solutions d'assistance adaptative aux opérations de maintenance dans un environnement industriel. La première partie présente ainsi l'état de l'art des applications de la réalité augmentée dans l'industrie et plus spécifiquement, dans le domaine de la maintenance industrielle. Cette partie détaille également le contexte de la maintenance industrielle dans le secteur aéronautique.

La deuxième partie synthétise les limitations observées dans l'état de l'art pour ainsi formuler les problématiques scientifiques traitées dans le cadre des travaux de recherche présentés ici.

La troisième partie détaille la méthodologie développée afin d'apporter des éléments de réponses aux problématiques scientifiques formulées dans la partie précédente. Cette méthodologie est conçue pour être applicable à l'ensemble des opérations de maintenance industrielle rencontrées dans le secteur aéronautique. Elle apporte une structure au concept d'assistance adaptative en réalité augmentée pour les opérations de maintenance afin d'identifier les caractéristiques clés des opérations et de l'environnement de maintenance à prendre en compte pour concevoir un système utile au plus grand nombre.

La quatrième partie présente les différentes études, menées en laboratoire et en environnement industriel, élaborées pour apporter des éléments de réponses aux problématiques scientifiques déjà mentionnées dans les parties précédentes. Par ailleurs, les dispositifs utilisés dans ces différentes études ont tous été conçus en s'appuyant sur la méthodologie développée dans la partie précédente.

Enfin, ce manuscrit se conclue sur la synthèse des résultats décrits dans la partie précédente et les contributions apportées par l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit. Cette conclusion est aussi l'occasion de proposer des perspectives visant à approfondir les résultats présentés tout en abordant d'autres problématiques connexes à l'introduction d'une assistance adaptative dans un contexte industriel et n'étant pas traitées dans le cadre des travaux présentés.

Première partie
Contexte et Etat de l'Art

1. Contexte et état de l'art

1.1. Industrie 4.0

L'arrivée de nouvelles technologies dans le monde industriel a entraîné différentes évolutions dans l'organisation et les méthodes de travail. À plusieurs reprises, l'intégration de certaines technologies dans les processus industriels a même amorcé de véritables révolutions industrielles.

Le développement des nouvelles technologies du numérique s'appuie aujourd'hui sur une puissance informatique croissante et plus accessible que jamais, rendant ainsi possible l'exploitation d'applications gourmandes en ressources telles que la reconnaissance d'images, l'intelligence artificielle et tout ce qui a trait au big data. La connectivité est également au cœur des technologies innovantes d'aujourd'hui telles que le cloud computing ou l'IIoT (Industrial Internet of Things). Toutes ces innovations conduisent à une nouvelle rupture technologique impactant de nombreux secteurs d'activité. De nos jours, cette rupture est ainsi désignée comme la 4^{ème} révolution industrielle [1]. On parle aussi plus généralement d'Industrie 4.0 [2]. Cette transition est déjà en marche depuis quelques années et de nombreuses technologies du numérique sont déjà en cours de déploiement dans divers secteurs d'activité.

Cette 4^{ème} révolution industrielle se distingue des précédentes dans la mesure où elle ne consiste pas uniquement à automatiser davantage les processus industriels mais elle cherche également à replacer l'opérateur humain au centre des activités industrielles. Le domaine de la cobotique vise, par exemple, à rassembler les opérateurs humains et les machines dans le même espace de travail afin de les faire collaborer directement. Les systèmes d'informations et les technologies numériques ont aujourd'hui une place toujours plus importante dans l'environnement industriel. Certaines technologies de l'Industrie 4.0 visent donc à mieux intégrer les opérateurs au sein de leur environnement de travail.

Parmi ces technologies on retrouve la Réalité Augmentée (RA) et la Réalité Virtuelle (RV). Ces deux technologies sont souvent regroupées sous le terme Réalité Mixte (MR pour *Mixed*

Reality), traduisant la notion de continuum Réalité-Virtualité proposé par Milgram et Kishino [3]. Ces notions encore trop largement confondues, représentent des technologies dont les concepts sont pourtant bien différents. C'est pour éviter cette confusion que le framework proposé par Rauschnabel et al. [4] désigne plutôt le terme de Réalité Étendue (XR pour *eXtended Reality*) comme terme parapluie couvrant les deux technologies de RA et RV. La différence fondamentale entre celles-ci se fait au niveau de la présence, au moins visuellement, de l'environnement réel au sein de l'expérience utilisateur. La réalité virtuelle immerge complètement l'utilisateur dans un environnement virtuel, entièrement calculé informatiquement, tout en isolant une partie de ses sens (principalement la vue et l'ouïe) du monde réel. La réalité augmentée, quant à elle, incorpore des éléments virtuels à l'environnement réel sans pour autant que ces éléments se substituent complètement au réel. Le framework de Rauschnabel et al. [4], baptisé XReality, est illustré par la Figure 1.

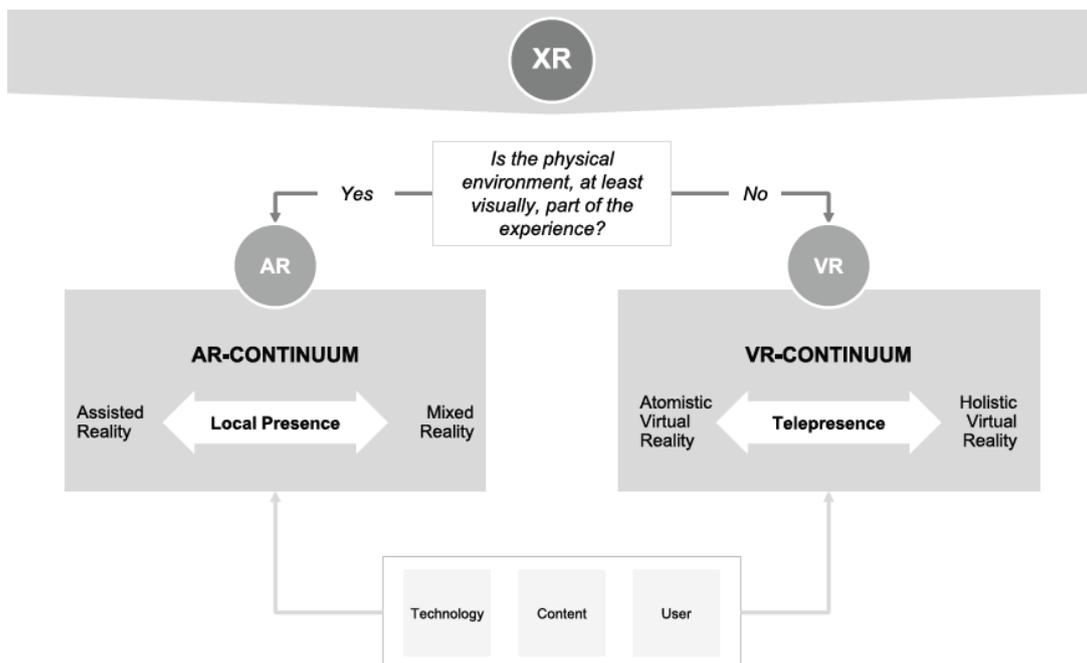


Figure 1 : Framework XReality proposé par Rauschnabel et al. [4]

C'est cette capacité à apporter des informations en contexte de travail réel qui est intéressante pour les applications industrielles. En effet, si la réalité virtuelle permet très bien de simuler des opérations de production ou de maintenance, la réalité augmentée, quant à elle, permet de

travailler directement sur des équipements réels présents dans l'environnement industriel. Il faut toutefois veiller à ne pas surcharger les scènes de travail d'informations car cela risquerait d'occulter la vision de l'environnement réel.

La réalité augmentée constitue un outil puissant de l'Industrie 4.0 car elle a le potentiel pour faciliter les échanges d'information entre les opérateurs humains et les machines ainsi que les systèmes d'information de l'entreprise. C'est donc pour accompagner cette volonté de placer l'opérateur humain au centre des activités industrielles que cette technologie se démocratise. En effet, la réalité augmentée a la capacité de fournir une assistance beaucoup plus intuitive et efficace que les procédures actuellement en place dans les ateliers. Plus qu'une aide standardisée plus facile à interpréter, cette technologie a un véritable potentiel pour fournir une aide personnalisée et adaptée à chaque profil d'opérateur avec à la clé de nombreux bénéfices à la fois en termes de performances, de flexibilité mais aussi de confort de travail pour les opérateurs.

1.2. Réalité Augmentée

1.2.1. Historique

Si la définition des concepts fondateurs à l'origine de la réalité augmentée est difficile à dater, il est en revanche possible de remonter aux premières réalisations techniques tentant d'immerger l'utilisateur dans l'espace virtuel ou de mélanger des éléments virtuels avec l'environnement réel. La première tentative de mise en œuvre d'un dispositif de réalité augmentée connue est le prototype de visiocasque conçu et développé par Ivan Sutherland en 1968 [5]. Ce dispositif permet de visualiser interactivement des représentations 3D en fil de fer (Figure 2b et Figure 2c). Contrairement aux essais préliminaires menés précédemment, ce système dispose d'un écran miniature pour chaque œil (Figure 2a), permettant ainsi la génération d'un affichage stéréoscopique. Le système prend également en compte les mouvements de la tête de l'utilisateur afin d'ajuster la perspective de la scène présentée selon le point de vue réel de l'utilisateur.

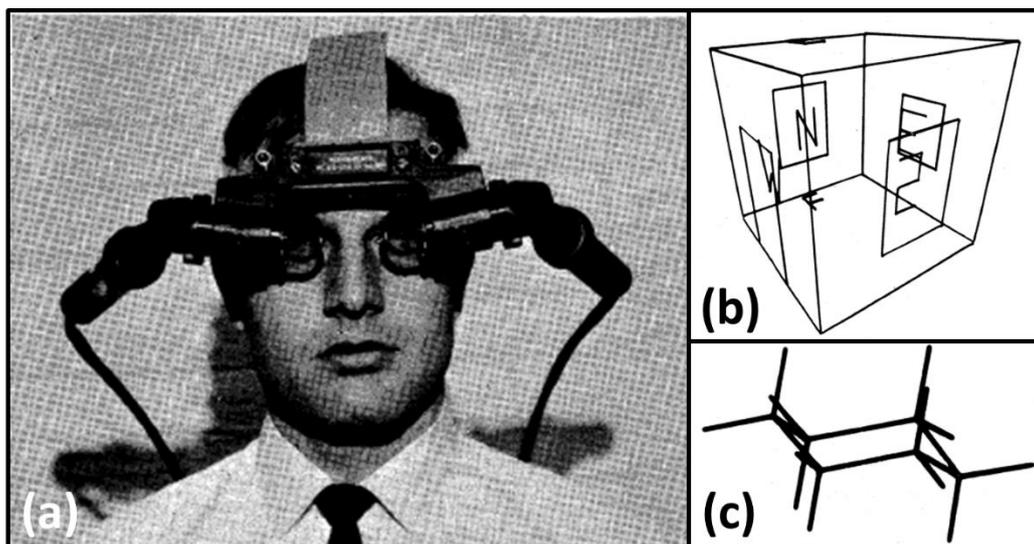


Figure 2 : (a) Dispositif présenté par Sutherland [5] | (b) et (c) Représentations 3D visualisées via le dispositif

Par la suite, les nouvelles propositions s'enchaînent plus rapidement dans les années 1980 avec des succès commerciaux comme le Eye-Tap de Steve Mann en 1984 qui connaîtra de nombreuses itérations jusqu'à aujourd'hui. À ce stade la réalité augmentée est encore indissociable de son support matériel, le visiocasque. Il faudra attendre la fin des années 1990 et notamment les travaux de Ronald Azuma [6], qui en proposera une définition du concept de réalité augmentée dissociée de tout support matériel. Selon cette définition, la réalité augmentée est une technologie caractérisée par trois éléments essentiels : la combinaison du réel et du virtuel, l'interactivité en temps réel, le tout étant inscrit en 3D. La réalité augmentée a commencé à mieux se faire connaître au début des années 2010 avec la présentation, suivie de la commercialisation des Google Glass [7] en 2014. L'utilisation généralisée des smartphones intégrant une puissance de calcul suffisante pour opérer des applications de réalité augmentée aura encore accéléré la démocratisation de la technologie auprès du grand public. Parmi ces applications utilisées par des millions d'utilisateurs, on peut citer le réseau social Snapchat [8] proposant des filtres vidéo basés sur la reconnaissance faciale ou encore le jeu Pokémon Go [9] permettant au joueur de visualiser des créatures virtuelles dans son environnement réel en utilisant la caméra et les données GPS de son smartphone.

Aujourd'hui la réalité augmentée est une technologie ayant une portée aussi bien sur une utilisation par le grand public que dans le secteur professionnel. Comme nous le verrons dans la section 1.2.3, les dispositifs permettant de délivrer une expérience en réalité augmentée sont aujourd'hui nombreux. Bien que certains de ces dispositifs fassent encore l'objet de recherche et de développement afin d'améliorer toujours plus leurs performances, la plupart se basent sur des technologies déjà bien établies (comme les smartphones et tablettes) et assez mature pour une utilisation en conditions industrielles, dépassant le cadre des essais en laboratoire. De plus, et comme nous allons le voir dans les sections suivantes, de nombreux bénéfices de la réalité augmentée sont aujourd'hui identifiés et démontrés, notamment en termes de performances opérationnelles, que ce soit en temps ou en qualité. C'est pourquoi la recherche actuelle concernant la réalité augmentée s'oriente de plus en plus vers des problématiques centrées sur l'expérience utilisateur. Ces recherches s'intéressent ainsi aux moyens de faciliter la compréhension des informations délivrées par la réalité augmentée et au transfert de connaissances que la technologie offre de manière plus générale. L'heure n'est donc plus à la conception de systèmes uniquement performants et efficaces mais plutôt à l'élaboration d'architectures plus intelligentes, capable de prendre en compte les interactions et les besoins

de l'utilisateur. C'est dans cette démarche que s'inscrivent les travaux de recherches présentés dans le présent manuscrit.

1.2.2. Principes de fonctionnement

Le concept clé de la réalité augmentée est le principe de superposition consistant à présenter, en temps réel, des informations digitales en surimpression par rapport à l'environnement réel [10]. Les intérêts de cette superposition sont multiples et visent avant tout à faciliter la recherche et l'apport d'information pour l'utilisateur. Ce principe permet également de replacer une information en contexte et donc de diminuer l'effort nécessaire pour en interpréter la signification.

À ce concept de base vient s'ajouter la notion de compréhension de l'environnement. Ainsi, s'il existe des systèmes s'approchant de la réalité augmentée et ne prenant pas en compte ce paramètre comme dans le cas de l'Affichage Tête Haute (ATH) présent dans l'aviation et dans certains véhicules automobiles, la plupart des systèmes de réalité augmentée intègrent un module de reconnaissance de l'environnement permettant de localiser et contextualiser les informations présentées par rapport à l'environnement d'exécution. La plupart de ces systèmes utilisent une caméra optique et un algorithme de reconnaissance d'image dans le but de repositionner les éléments virtuels par rapport à des points de repère spatiaux. Plusieurs méthodes coexistent pour détecter et suivre (on parle de *tracking*) la localisation du point de vue de l'utilisateur dans l'environnement réel. La méthode la plus simple requiert l'utilisation de marqueurs spécifiques, facilement identifiables par l'algorithme de reconnaissance d'image. Ces marqueurs peuvent prendre la forme de n'importe quelle image, bien que le plus souvent ceux-ci prennent la forme de QR codes, plus faciles à détecter pour une machine. Le marqueur est généralement placé sur une surface plane. En déterminant l'échelle et l'orientation apparentes de ce marqueur, le système est capable d'évaluer la distance et l'angle de vue d'observation de l'utilisateur. Certains algorithmes plus avancés parviennent à se passer de marqueur en identifiant des éléments caractéristiques de l'environnement (comme les arrêtes d'une table ou les coins d'une pièce). On parle alors de marqueurs naturels. C'est par exemple cette méthode qui est utilisée par le casque HoloLens 2 de Microsoft [11]. Une autre méthode basée sur la reconnaissance d'objet existe également. Dans ce cas, le modèle 3D de l'objet à

détecter est utilisé comme référence afin de recalibrer le point de vue réel de l'observateur dans le repère 3D.

Notons que, normalement, le suivi de l'environnement réel est perdu lorsque le marqueur ou l'objet utilisé comme point de repère sort du champ de vision de la caméra. Ce problème peut être corrigé en utilisant d'autres capteurs comme les gyroscopes et les accéléromètres (présents dans les smartphones par exemple) pour prendre le relais du suivi. On parle alors de suivi étendu.

1.2.3. Systèmes de réalité augmentée

Bien que le concept de réalité augmentée soit indépendant de toute solution matérielle, le choix de cette dernière entraîne des répercussions sur les informations et la compréhension que le système de réalité augmentée peut obtenir de l'environnement réel et de l'utilisateur. Cette section présente donc les différentes typologies de dispositifs de réalité augmentée existantes à ce jour afin de fournir une meilleure compréhension de leur fonctionnement, de leurs avantages mais aussi de leurs limites, qui entreront en compte dans la conception du système d'assistance adaptative en réalité augmentée décrite dans la méthodologie proposée dans la troisième partie du présent manuscrit.

Dispositif de réalité augmentée type

Les terminaux permettant de délivrer une expérience de réalité augmentée sont aujourd'hui nombreux et peuvent prendre des formes très variées. On retrouve cependant des éléments caractéristiques communs à tous ces systèmes car ces derniers sont nécessaires à la bonne mise en application des principes de fonctionnement vus ci-dessus. Ainsi, un dispositif de réalité augmentée est composé de trois éléments essentiels à son bon fonctionnement : (1) Un ou plusieurs capteurs permettant d'acquérir des informations sur l'environnement afin de recalibrer le flux d'informations virtuelles sur le flux visuel de l'environnement. (2) Une unité de calcul chargée à la fois de générer l'environnement virtuel comportant les informations à afficher pour l'utilisateur et de recalibrer le repère de cet environnement virtuel avec le repère de l'environnement réel afin que les flux visuels de ces deux environnements se superposent correctement. (3) Un afficheur chargé de présenter les informations virtuelles à l'utilisateur. La Figure 3 schématise le fonctionnement d'un dispositif de réalité augmentée type.

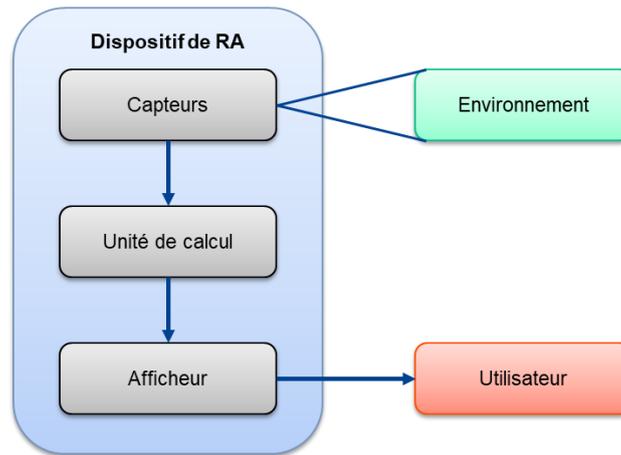


Figure 3 : Dispositif de réalité augmentée type

Les terminaux de réalité augmentée les plus répandus sont bien entendu les smartphones et les tablettes qui disposent d'une caméra intégrée permettant la reconnaissance de l'environnement et, par conséquent, un recalage des éléments virtuels dans l'environnement réel. Ces périphériques intègrent également des capteurs d'accélération et d'orientation permettant de mettre en place un suivi étendu. Le principal inconvénient de ce type de support réside dans le besoin d'être tenu en main pendant toute la durée de la session d'utilisation. Ils présentent en revanche les avantages d'être peu coûteux et très mobiles, ce qui en font de très bons matériels pour les applications peu gourmandes en puissance de calcul et ne nécessitant pas d'avoir les mains libres.

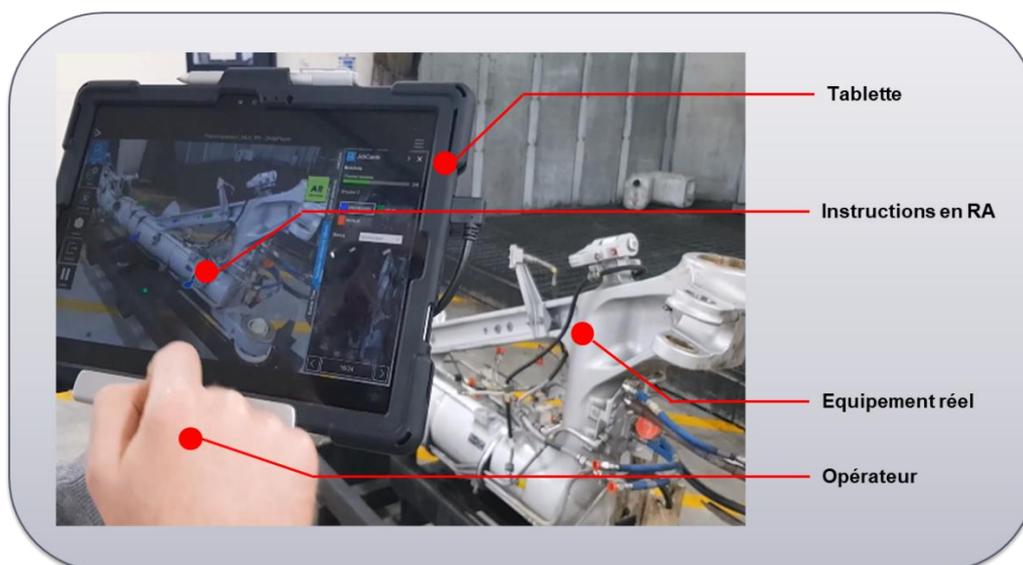


Figure 4 : Exemple d'application industrielle de réalité augmentée sur tablette

Station fixe

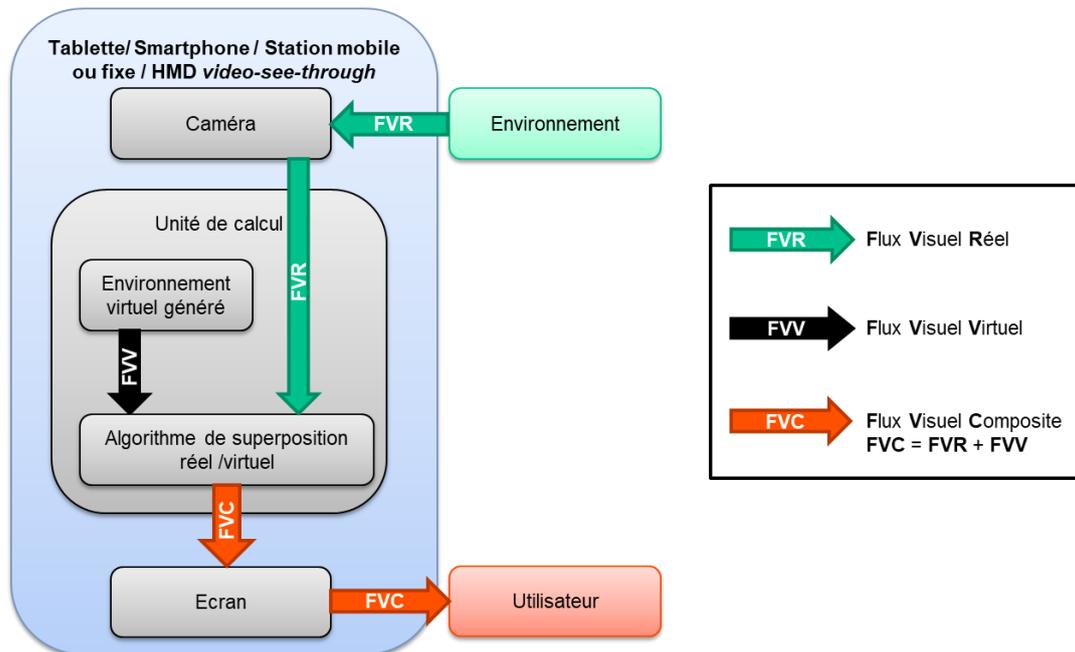


Figure 5 : Gestion des flux d'informations visuelles pour smartphones / tablettes / stations fixes ou mobiles / HMD *video-see-through*

La station fixe (voir Figure 6) comprenant un PC fixe, un grand écran et une caméra montée sur un flexible, permet de s'affranchir de cette contrainte. L'utilisateur peut utiliser ses mains pour faire autre chose que tenir le dispositif de réalité augmentée tout en gardant la possibilité d'ajuster la position de la caméra de façon ponctuelle. Cette solution réduit grandement la mobilité de l'utilisateur et limite donc son utilisation à des cas nécessitant peu voire pas de déplacements dans l'environnement réel. Il existe toutefois des équivalents mobiles à ces stations. Ces dernières présentent les mêmes caractéristiques que leurs homologues fixes mais tout le matériel est monté sur un châssis (le plus souvent une desserte) disposant de roulettes permettant de déplacer l'ensemble sur de courtes distances (du fait de l'encombrement non négligeable de ce genre de matériel). L'autonomie des batteries de ce type de dispositif présente des contraintes importantes résultantes des besoins énergétiques de l'importante puissance de calcul embarquée. La Figure 5 représente la gestion des flux d'informations visuelles pour les différents dispositifs présentés jusqu'à présent.

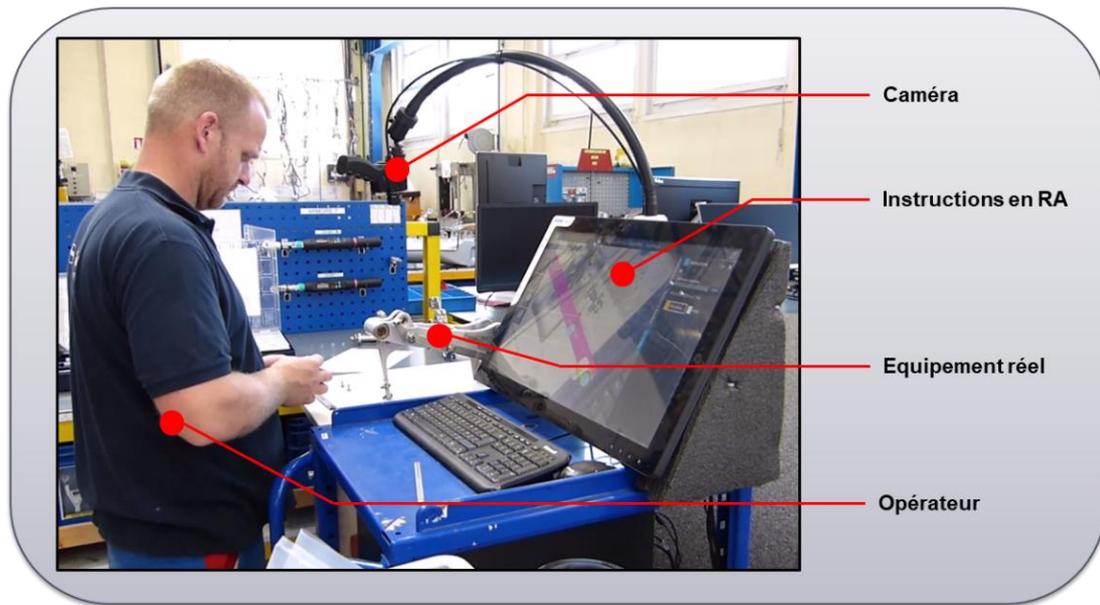


Figure 6 : Exemple d'application industrielle de réalité augmentée sur station fixe

Système projectif

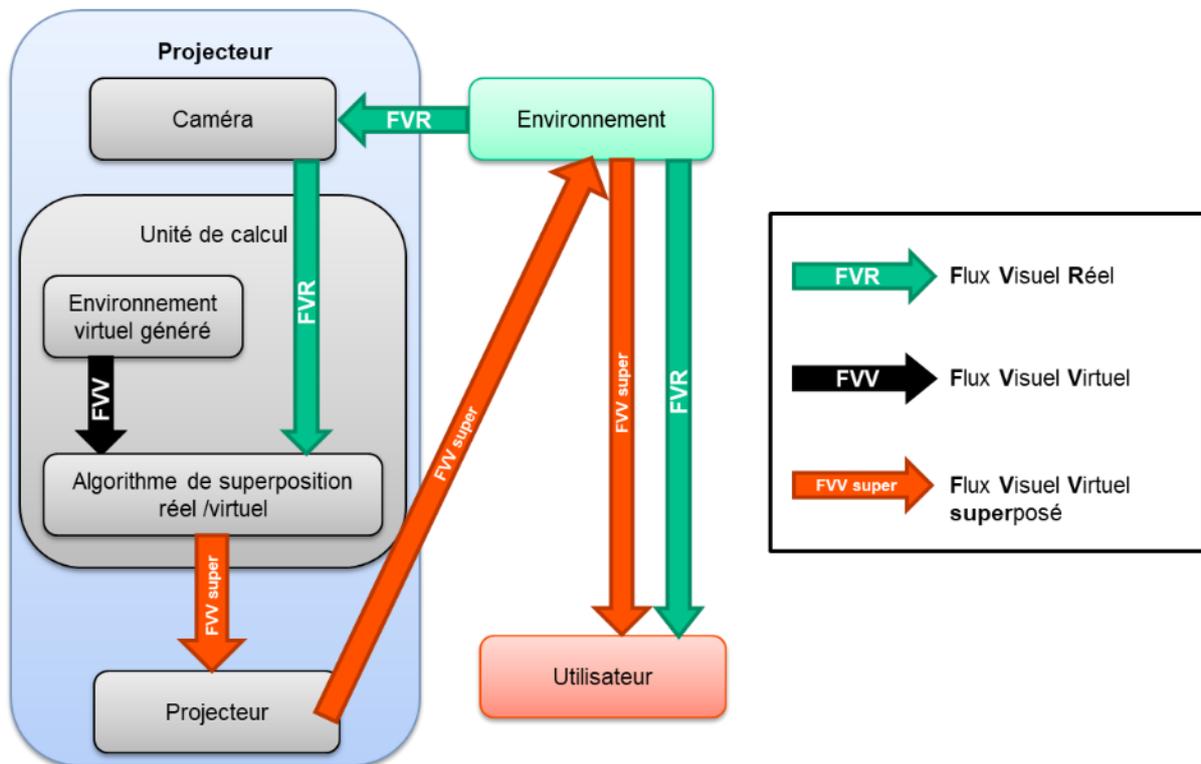


Figure 7 : Gestion des flux d'informations visuelles pour projecteur

Une autre solution consiste à projeter le contenu virtuel directement sur la pièce ou l'environnement de travail. La localisation des informations est grandement facilitée et l'utilisateur est libre de se mouvoir dans l'environnement réel. L'utilisation d'un tel dispositif requiert néanmoins un aménagement du poste de travail particulier afin que l'image provenant du projecteur ne soit que peu souvent masquée par des éléments de l'environnement (bâti de travail, outils, etc. ...) ou l'utilisateur. De plus, les équipements présentant une géométrie complexe se portent moins à la projection. La Figure 7 représente la gestion des flux d'informations visuelles pour les systèmes projectifs.



Figure 8 : Exemple de système projectif

Visiocasque

Enfin, le visiocasque (aussi nommé HMD pour Head Mounted Display) est une solution mains libres et autonome fonctionnant sur batteries. La puissance de calcul peut être embarquée ou déportée. Certains modèles de visiocasques disposant d'une puissance embarquée peuvent également mobiliser plus de ressources en faisant appel au Cloud selon les besoins de l'application. Enfin, deux grandes familles de visiocasques se distinguent selon la façon dont l'environnement réel est présenté à l'utilisateur. Les visiocasques dits *optical-see-through* permettent de voir l'environnement réel directement au travers des écrans et de la visière du visiocasque car ces éléments sont transparents (

Figure 10a). Les visiocasques *video-see-through* isolent l'utilisateur de l'environnement extérieur et doivent donc recourir à l'utilisation de caméras situées à l'avant du casque filmant l'environnement réel. C'est ensuite une image composite, agrégeant ce flux vidéo du réel avec les éléments virtuels, qui est présentée à l'utilisateur en temps réel (

Figure 10b). La gestion des flux d'informations visuelles pour les visiocasques *video-see-through* étant les même que sur les smartphones et tablette, elle est représentée par la Figure 7. La gestion des flux d'informations visuelles pour les visiocasques *optical-see-through* diffère légèrement de cette dernière et est donc représentée par la Figure 9.

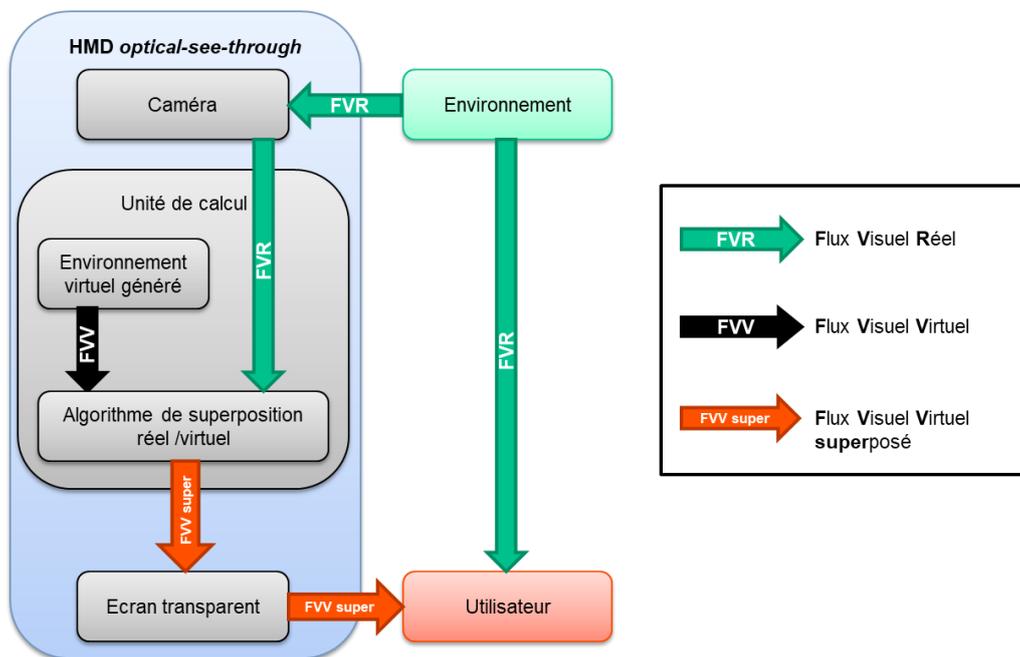


Figure 9 : Gestion des flux d'informations visuelles pour HMD *optical-see-through*

Tous ces systèmes présentent chacun des avantages et des limitations. Si tous ont déjà fait leurs preuves lors d'expérimentations en laboratoire ou de phases pilotes en environnement industriel, leur maturité technologique, et par conséquent leur potentiel à être déployé à grande échelle dans l'industrie, reste variable d'une solution à l'autre. De plus, la portabilité offerte par ces équipements est différente d'une technologie à l'autre. En effet, deux critères très importants à prendre en compte lors du choix du dispositif de réalité augmentée sont sa portabilité et sa capacité à ne pas mobiliser les mains de l'utilisateur. Les tablettes et les smartphones sont des dispositifs offrant une très grande mobilité mais nécessitant l'usage d'une voire des deux mains, restreignant ainsi les interactions possibles de l'utilisateur avec les

éléments de l'environnement réel. Les projecteurs et les stations sur ordinateur fixes laissent les deux mains libres mais ne sont pas du tout mobiles. Certaines applications font le compromis d'utiliser une station mobile intégrant un ordinateur à une desserte afin d'offrir plus de mobilité à l'utilisateur tout en gardant ses mains libres sauf le temps de déplacer la station. Cette solution n'est cependant pas aussi mobile qu'une tablette ou un smartphone car ce genre de station, plutôt imposante, peut être difficile à manœuvrer. Seuls les visiocasques parviennent à allier mobilité et liberté au niveau de l'usage des mains. Cette technologie est cependant encore en développement et comporte encore certaines contraintes ergonomiques et techniques liées au poids des casques, au faible champ de vision proposé (toujours bien inférieur à celui de la vision humaine) ou encore à l'autonomie limitée des batteries. À cela s'ajoutent des contraintes au niveau de l'acceptabilité de ces dispositifs d'un genre nouveau auxquels la plupart des utilisateurs ne sont pas encore bien familiarisés comme ils peuvent l'être avec un smartphone ou une tablette. On peut enfin noter une dernière différence entre les deux types de visiocasques. En effet, pour les visiocasques *optical-see-through* il existe un décalage physique entre la position des yeux de l'utilisateur et celle des caméras de l'appareil, ce qui peut parfois représenter une gêne pour superposer correctement les deux flux d'information (réel et virtuel).

Le choix du dispositif dépend, finalement, de plusieurs facteurs liés aux contraintes inhérentes au cas d'application et à l'environnement d'exploitation.

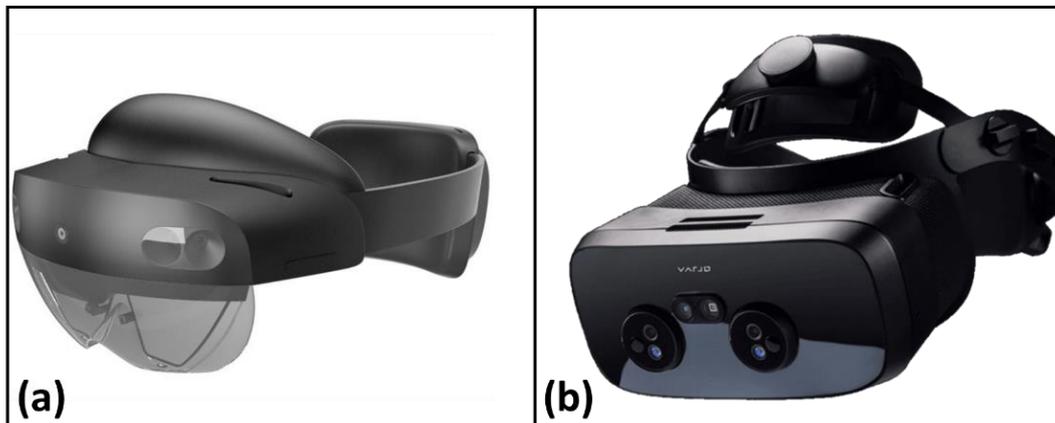


Figure 10 : (a) Visiocasque *optical-see-through* (Hololens 2) | (b) Visiocasque *video-see-through* (Varjo XR-3)

1.2.4. Création et édition des contenus de réalité augmentée

La création de contenus destinés à la réalité augmentée nécessite souvent l'utilisation de plusieurs outils ou logiciels afin de convertir, préparer ou mettre en forme les données avant de pouvoir les visualiser et d'interagir avec elles de la manière la plus intuitive possible. Les données pouvant être exploitées en réalité augmentée sont de nature variée et peuvent être présentées sous de nombreuses formes. Cela peut être du texte, de l'audio, de la vidéo ou des données visuelles en deux dimensions telles que des images, des schémas ou des pictogrammes. À ces vecteurs d'informations s'ajoutent les données tridimensionnelles (3D) telles que les maquettes numériques réalisées à l'aide d'outils de modélisation 3D comme CATIA [12], Creo [13], 3DSmax [14] ou Blender [15]. Ces données 3D, parfois appelées augmentations ou hologrammes, peuvent être présentées de façon statique ou être animées. Ce mode de représentation des informations est tout à fait adapté à la réalité augmentée car il permet de contextualiser ces informations de façon réaliste et crédible grâce à la spatialisation dans l'environnement réel.

Préparation des données 3D

Les données 3D peuvent demander un traitement en amont avant de pouvoir les exploiter correctement via la réalité augmentée. Cela est principalement dû à l'existence de deux approches différentes dans la gestion des données 3D en informatique. La première approche, dite « surfacique » (B-Rep) est celle utilisée par les logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui se base sur une définition fonctionnelle et paramétrique des surfaces représentées dans les modèles 3D. C'est ce genre de données qui est utilisé dans la majorité des départements de conception mécanique du milieu industriel car il permet d'appliquer de nombreux modèles de calculs nécessaires aux simulations de fonctionnement et de performances des équipements et produits conçus. La deuxième approche dite « polygonale » repose, quant à elle, sur la définition d'un maillage composé de points et de polygones formés en reliant ces points. Ces polygones sont la plupart du temps des triangles voire des quadrilatères. C'est cette approche qui est utilisée dans les applications fonctionnant en temps réel comme les jeux vidéo. L'objectif de la réalité augmentée étant de rendre les informations 3D selon le point de vue de l'utilisateur actualisé en temps réel, c'est tout naturellement cette 3D polygonale qui est utilisée par les solutions de réalité augmentée. Dans le milieu industriel,

les modèles 3D surfaciques, issus des bureaux de conception, doivent donc être convertis en 3D polygonale pour être compatibles avec les solutions de réalité augmentée.

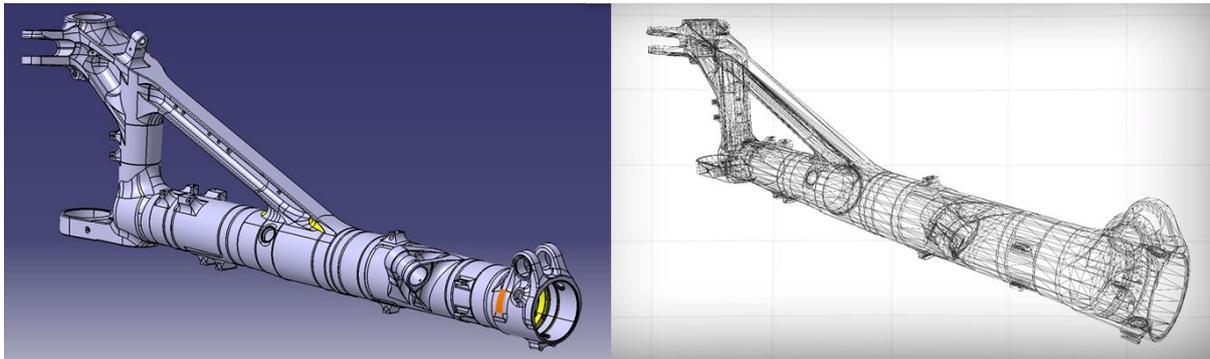


Figure 11 : Représentation 3D en surfacique (à gauche) et en polygonale (à droite)

Cette étape de conversion peut être intégrée à l'outil de création de contenus en réalité augmentée (ex : CATIA Composer [16]) ou peut nécessiter l'utilisation d'un logiciel dédié comme PiXYZ Studio [17]. Cette conversion doit être réalisée en respectant des règles précises. En effet, passer d'une définition surfacique à un maillage polygonal revient à discrétiser les surfaces des modèles 3D. Il faut donc veiller à ce que ce maillage ne soit pas trop grossier afin de ne pas perdre trop d'information sur la géométrie du modèle 3D.

Création de l'expérience de réalité augmentée

Une fois toutes les données d'entrée préparées, elles peuvent être intégrées dans le scénario de réalité augmentée soit en utilisant une solution de développement d'applications et proposant des outils permettant l'intégration et la gestion de fonctionnalités en réalité augmentée comme les moteurs de jeu Unity [18] ou Unreal Engine [19], soit en passant par des logiciels dédiés à la création et à l'édition de scénarios en réalité augmentée tels que Vuforia Studio [20] ou Diota Editor [21]. Ce type de solution dédiée, bien que moins polyvalent que les moteurs de jeu évoqués ci-dessus en termes de développement de fonctionnalités spécifiques, permet de concevoir des scénarios de réalité augmentée sans avoir besoin de connaissances ou de compétences spécifiques au développement d'applications. Ces briques d'édition de contenu proposent des outils permettant de gérer la disposition des différents éléments d'information dans l'espace de travail. En effet, les applications de réalité augmentée diffèrent des interfaces homme machine conventionnelles du fait de leur nature tridimensionnelle. Cela impose aux

concepteurs d'expériences en réalité augmentée d'anticiper les zones d'intérêts présentes dans l'environnement. En effet, contrairement aux interfaces 2D classiques pouvant être balayées d'un simple regard afin de prendre connaissance de l'ensemble des informations, la disposition des éléments dans la scène en réalité augmentée doit être réfléchie de façon que l'utilisateur ne perde pas son temps à chercher les informations dans son environnement. C'est pourquoi cette étape de conception de scénario est primordiale dans le succès d'une application de réalité augmentée. Enfin, les informations en réalité augmentée sont présentées dans l'application développée spécifiquement ou bien dans une application de lecture des contenus associée à la solution d'édition.

Comme le soulignent Palmarini et al. [22], la diversité de l'offre de solutions d'édition de contenus peut avoir tendance à fragmenter le paysage des applications en réalité augmentée. La sélection de l'écosystème logiciel permettant le développement et l'exploitation de contenus en réalité augmentée est donc une étape cruciale dans la mise en place de nouvelles procédures d'assistance aux opérations.

1.2.5. La réalité augmentée dans l'industrie

La réalité augmentée trouve déjà de nombreuses applications dans des secteurs très variés. Parmi les exemples les plus connus, nous pouvons citer la mode, la vente, l'éducation, la médecine, le patrimoine, la conduite ou encore le divertissement [9]. Les principales applications industrielles de cette technologie sont liées à la formation ou à l'assistance aux opérations de production et de maintenance. On retrouve aujourd'hui la réalité augmentée tout au long du cycle de vie des produits, de la conception à la réparation en passant par la revue de projet, la production ou encore l'inspection.

Regenbrecht et al. [23] fournissaient déjà une revue de plusieurs applications de la réalité augmentée dans les secteurs de l'aérospatial et l'automobile dans les années 2000. Parmi les cas d'usages évoqués on peut citer le changement de filtre dans la station spatiale internationale, la maintenance de moteurs, la conception d'intérieurs d'avions, la revue de conception collaborative ou encore le câblage de véhicules automobiles.

En 2012, Nee et al. [24] présentent à leur tour une revue des applications industrielles de la réalité augmentée ainsi que des systèmes et logiciels utilisés pour développer et mettre en œuvre ces applications. Les auteurs mettent en avant la diffusion à grande échelle de plateformes dédiées au développement d'applications en réalité augmentée telles que ARToolKit et ses dérivés ou encore ARTag. La majorité des cas d'usage évoqués restent des expérimentations faites en laboratoire. Le transfert à l'environnement de maintenance réel est identifié comme un axe de recherche. Plusieurs contraintes pouvant intervenir lors de ce transfert sont également abordés.

Plus récemment, de Souza Cardoso et al. [25] livrent une synthèse des applications industrielles de la réalité augmentée au cours des années 2010. Le nombre d'études dans le domaine est en nette progression et implique aussi bien le secteur public que le secteur privé. Concernant les cas d'usages abordés dans les études retenues dans cette synthèse, l'assemblage reste largement en tête, bien devant les activités de maintenance. Le matériel utilisé reste varié avec en tête les visiocasques (40%) ainsi que les tablettes (23%) et les moniteurs (24%) [25]. Toujours du point de vue technique, la méthode de tracking la plus utilisée reste la détection de marqueur (57%). Ce dernier point rejoint le constat fait par Eswaran et al. [26]. À ce sujet, les auteurs énoncent l'importance du développement des technologies de reconnaissance 3D dans les recherches à venir afin de rendre les expériences de réalité augmentée plus fluides et simples d'utilisation. Les nombreux bénéfices démontrés de la réalité augmentée appliquée aux opérations industrielles sont également présentés avec, en tête, la réduction du temps d'exécution (32%), l'amélioration de la qualité (26%) et l'amélioration de l'apprentissage (22%). Enfin les défis identifiés par les auteurs des différentes études analysées sont également compilés. Parmi ceux-ci nous retrouvons la qualité de projection, la précision et les interactions (25%), Le matériel (25%) et les méthodes de tracking (24%). L'ensemble des résultats pour ces deux derniers points (bénéfices et défis) est présenté sur la Figure 12. Damiani et al. [27] notent également une forte progression de la production scientifique concernant les applications industrielles de la réalité augmentée (et virtuelle) entre 2012 et 2017. Parmi les domaines couverts par cette technologie, les auteurs identifient la conception produit, la logistique, la gestion et la sécurité des systèmes de productions ainsi que la maintenance.

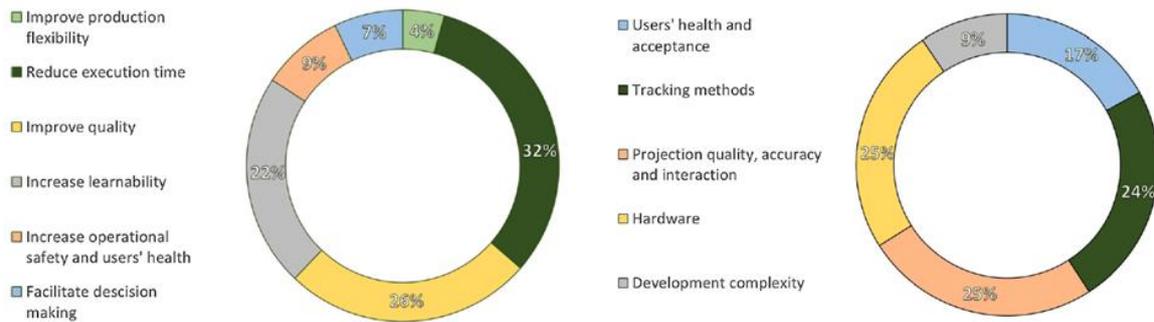


Figure 12 : Répartition des bénéfices apportés (à gauche) et défis identifiés (à droite) pour l'utilisation de la réalité augmentée en environnement de production [25]

Devagiri et al. [28] délivrent une description et un comparatif des plateformes et des frameworks de réalité augmentée les plus utilisés dans l'industrie. Les auteurs partagent également les résultats de leur revue de littérature concernant les applications industrielles de la réalité augmentée. Ainsi, l'assemblage, la maintenance ainsi que la formation constituent les trois grands domaines d'activité traités par la réalité augmentée en milieu industriel. La réalité augmentée est adaptée à ces activités car elle permet d'apporter la bonne information au moment opportun et ainsi, d'éviter aux opérateurs de retenir de grandes quantités d'informations. Les auteurs insistent également sur le potentiel du couplage entre la réalité augmentée et l'intelligence artificielle pour répondre aux problématiques rencontrées dans l'industrie bien que des défis technologiques subsistent. Parmi ces défis, Eswaran et al. [26] soulignent l'importance d'améliorer les technologies de suivi afin d'être assez robustes pour une utilisation transparente de la réalité augmentée en milieu industriel où la variabilité des textures rencontrées sur les produits peut représenter un obstacle. L'utilisation du suivi sans marqueur est également une voie de recherche privilégiée pour remplacer le suivi avec marqueur encore largement utilisé mais peu adapté aux contraintes industrielles. Plus spécifiquement, Fraga-Lamas et al. [29] proposent une revue de l'utilisation de la réalité augmentée dans le secteur de la construction navale. Cette étude montre que les particularités d'une industrie peuvent orienter certains choix de conception des systèmes d'assistance aux opérations. A titre d'exemple, la taille des équipements et des installations en jeu dans l'industrie navale impose l'utilisation de visiocasque afin de permettre aux opérateurs de circuler librement.

1.2.6. Applications de la réalité augmentée dans la maintenance industrielle

La complexité et la variabilité des tâches de maintenance impliquent une mobilisation importante des capacités cognitives des opérateurs. Contrairement aux activités de production qui ne traitent que les dernières références actuellement commercialisées sur le marché, les activités de maintenance doivent aussi traiter tout un historique de références encore en exploitation. À cela s'ajoutent les évolutions pouvant être dues à une évolution des normes, une démarche d'amélioration continue des produits ou simplement des demandes des clients. Le nombre de configurations à traiter se trouve ainsi démultipliées. Il est donc impossible pour les opérateurs d'avoir une connaissance parfaite de l'ensemble des équipements sur lesquels ils interviennent. C'est cette complexité, découlant aussi bien des opérations traitées que des contraintes spécifiques à l'environnement de maintenance industrielle, qui induit le besoin d'une assistance lors des opérations. De nombreuses informations complémentaires sont donc utilisées afin de garantir un certain niveau de qualité sur les opérations effectuées. Ces informations sont encore bien souvent présentées sous forme de documents papier. La réalité augmentée se présente naturellement comme une alternative permettant de digitaliser ces contenus afin d'en simplifier l'accès et l'analyse. C'est pourquoi, comme nous allons le voir dans cette section, cette technologie fait l'objet de nombreuses recherches et développements dans le domaine de la maintenance.

Palmarini et al. [22] présentent une revue de l'application de la réalité augmentée à la maintenance industrielle. Cette analyse de la littérature met en lumière un paysage très diversifié des systèmes de réalité augmentée pour la maintenance que ce soit aussi bien concernant les solutions matérielles que logicielles. Les opérations de maintenance étudiées concernent majoritairement le montage et le démontage (33%) tandis qu'une moitié de ces opérations est équitablement répartie entre l'inspection et la réparation. Parmi les futurs axes de recherche émergeant de cette synthèse, outre l'amélioration du matériel et des algorithmes de reconnaissance d'image permettant le tracking, les auteurs identifient également les interactions avec le système comme développement futur majeur dans le domaine. Cet axe de recherche inclus le développement d'outils de gestion des contenus et de solutions d'édition de contenus ainsi que l'étude de nouvelles techniques de visualisation et une meilleure prise en compte de l'ergonomie.

Les résultats de la revue de littérature menée par del Amo et al. [30] confirment les observations évoquées ci-dessus aussi bien concernant les proportions des opérations traitées que les pistes de recherches se dégagent. Cette analyse révèle néanmoins d'autres informations intéressantes. Les équipements ciblés par les applications considérées sont majoritairement (68%) de petites dimensions telles que des circuits imprimés. La tendance du nombre de publications annuelles reste à la hausse, confirmant l'intérêt de la communauté scientifique pour les problématiques sous-jacentes à la maintenance.

1.2.7. Bénéfices de la réalité augmentée pour la maintenance industrielle

Le principe fondamental de la réalité augmentée est simple. Cette technologie positionne des informations virtuelles dans l'environnement réel de façon cohérente pour l'utilisateur. Les bénéfices potentiels découlant de la mise en œuvre de ce principe sont nombreux. En effet, la superposition des informations en contexte avec les éléments de l'environnement réel auxquels celles-ci se réfèrent permet de minimiser les changements d'attention et par conséquent, de diminuer la charge cognitive de l'utilisateur. Outre cette localisation contextualisée, la réalité augmentée offre également une représentation plus riche et naturelle par le biais de modèles 3D pouvant être animés (dans la littérature on trouve parfois les termes *augmentations* et *hologrammes* pour désigner ce type de contenu). La réalité augmentée permet ainsi de transmettre plus facilement des informations que les supports traditionnels tels que les instructions papier ou les instructions numériques. C'est pourquoi elle est souvent envisagée comme un outil favorisant le transfert de connaissances. Ce transfert peut se faire sous la forme de formations initiales organisées de façon ponctuelle ou bien sous la forme d'une assistance, directement lors de la réalisation d'actions ou de tâches. La réalité augmentée est également un outil très utile dans le cadre de l'assistance à distance puisqu'il permet à un expert d'échanger de façon plus naturelle auprès d'un utilisateur moins expérimenté.

Dans certains cas, la réalité augmentée permet également d'optimiser les procédés en apportant un support standardisé de tâches autrefois très manuelles et reposant grandement sur l'expertise et le savoir-faire des opérateurs les plus expérimentés. La reproductibilité ainsi obtenue d'une opération à l'autre permet de garantir une meilleure fiabilité et entraîne une diminution des problèmes de qualité. Certaines tâches intermédiaires de localisation de zones réalisées manuellement peuvent, par ailleurs, être évitées grâce à la réalité augmentée. C'est par exemple

le cas de la pose de masques avant traitement de surface, qui peuvent désormais être affichées directement sur la pièce au moyen d'un projecteur (Système décrit sur la Figure 7). Cela entraîne mécaniquement une diminution du temps de cycle du processus concerné. Concernant les bénéfices en termes de temps d'exécution, la réalité augmentée permet généralement de réduire le temps dédié à la recherche d'informations en présentant les bonnes informations au bon moment.

La réalité augmentée s'adresse ainsi au besoin croissant de flexibilité auquel les entreprises et donc les opérateurs doivent faire face dans un contexte économique toujours plus concurrentiel. La multiplication du nombre de configurations produites induit, pour l'opérateur confronté à une plus grande variété de tâches à réaliser, une difficulté supplémentaire pour atteindre la pleine maîtrise et l'expertise sur chacune de ces tâches [31]. En facilitant le transfert de connaissances et en standardisant les procédures, la réalité augmentée permet aux opérateurs de changer plus facilement de poste pour travailler sur des tâches qu'ils maîtrisent moins ou des produits qu'ils peuvent être amenés à traiter de façon plus ponctuelle. La réalité augmentée permet de réduire les temps de formation tout en améliorant l'engagement de l'apprenant sur la tâche mise en pratique ce qui a, par la même occasion, pour effet d'améliorer la rétention d'informations à moyen et long terme [32]. Les formations se veulent ainsi à la fois plus concises et plus efficaces. Par conséquent, il est plus facile pour les opérateurs d'étoffer leurs compétences et leurs connaissances sans trop sacrifier leurs performances sur leur activité usuelle. Damiani et al. [27] identifient, au travers de l'analyse de plusieurs études, l'apprentissage de tâches complexes et l'amélioration de la productivité des opérateurs comme bénéfices majeurs résultant de l'application de la réalité augmentée aux opérations de maintenance.

Outre ces bénéfices observés sur les activités de formation [33], la réalité augmentée peut également être utilisée comme un outil d'assistance lors de la réalisation des tâches rencontrées lors des opérations de maintenance industrielle. Cela permet soit de maintenir un niveau de performance élevée en entretenant les connaissances des opérateurs, soit de se passer de formation initiale et de se former directement sur le poste de travail. Cette vision de la formation dite *on-the-job* [33], très utilisée dans l'industrie, est parfois critiquée car le niveau de maîtrise des opérateurs formateurs peut fortement varier [34]. D'où la nécessité de proposer un outil fournissant des informations de façon plus standardisée. Par ailleurs, l'assistance aux opérations

peut s'imposer sur des tâches particulièrement complexes, pour lesquelles la formation ne suffit pas à maîtriser l'ensemble des connaissances nécessaires à leur bonne réalisation. Moghaddam et al. [35] proposent une classification des besoins d'assistance et de formation pour différentes tâches de maintenance selon la complexité du processus de prise de décision et celle de la manipulation physique des éléments. Les bénéfices apportés par la réalité augmentée sont aussi plus importants lorsque les tâches traitées se complexifient [36].

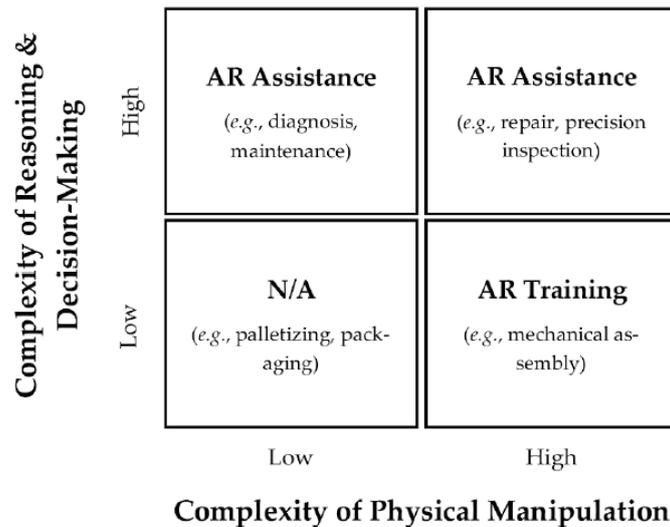


Figure 13 : Classification des besoins d'assistance et de formation proposée par Moghaddam et al. [35]

1.2.8. Synthèse

Les applications de la réalité augmentée aux activités industrielles font l'objet d'une recherche active depuis quelques décennies et tendant même à s'intensifier ces dernières années. Les bénéfices dans les domaines de la production et de la maintenance sont aujourd'hui connus et maîtrisés. Le gain de temps, la réduction des erreurs et la facilitation de la formation font partie des plus notables. De plus, les progrès fait au niveau du matériel et des plateformes de développement d'expérience en réalité augmentée permettent aujourd'hui une diffusion plus vaste et une intégration plus facile de cette technologie au sein des environnements de maintenance. Cette simplification des problématiques techniques permet désormais aux chercheurs et aux industriels de se concentrer davantage sur les aspects se rapportant à l'expérience utilisateur. Ainsi [26] identifient la génération des instructions de réalité

augmentée en fonction des caractéristiques cognitives de l'utilisateur comme un axe de recherche majeur pour les études à venir. En effet, comme nous le verrons plus en détail dans la section 1.4 de cette première partie, il est désormais primordial de tenir compte des caractéristiques des opérateurs afin de générer plus d'engagement et d'acceptabilité de leur part.

1.3. Maintenance Aéronautique

Comme mentionné en introduction, les travaux de recherches présentés dans ce manuscrit s'inscrivent dans un partenariat avec le groupe industriel aéronautique Safran. L'objectif de cette section est donc de présenter le contexte des activités de maintenance aéronautiques conduisant les acteurs du secteur à considérer l'intégration de la réalité augmentée dans leurs processus. Comme nous le verrons, certaines spécificités du secteur aéronautique impliquent le développement rapide de cette technologie au cœur de la nouvelle stratégie de digitalisation des activités de maintenance.

1.3.1. Environnement industriel aéronautique

L'environnement industriel du secteur aéronautique doit composer avec les exigences très fortes liées à la nature de ses activités. En effet, comme pour tout secteur faisant partie de l'industrie des transports, la principale préoccupation reste la sécurité des usagers. Les conditions d'exploitation des moyens de transport aériens imposent des contraintes techniques très importantes afin de permettre le bon fonctionnement de l'appareil en vol et au sol tout en maintenant un niveau de sécurité élevé pour les passagers.

Le secteur aéronautique fait intervenir de nombreux acteurs intervenant à différentes étapes de la production et de l'exploitation des équipements aéronautiques. Les différents équipements aéronautiques composant un avion sont fabriqués chez un équipementier (ex : Safran) faisant lui-même appel à de nombreux fournisseurs. Ces équipements sont ensuite assemblés chez l'avionneur (ex : Airbus et BOEING) qui est le concepteur de l'avion. Les avions sont ensuite vendus aux compagnies aériennes pour exploitation. Ces principaux acteurs sont présentés en Figure 14.

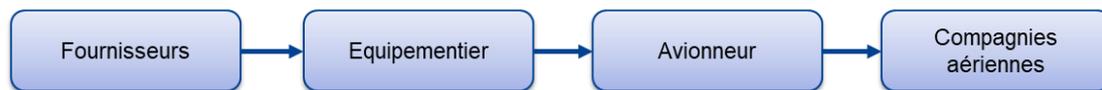


Figure 14 : Acteurs de l'industrie aéronautique

Bien que la crise Covid ait eu un impact non négligeable sur le trafic aérien à l'échelle mondiale, celui-ci connaît une reprise forte qui devrait le ramener au niveau d'avant crise d'ici quelques années. Ainsi une forte croissance de la demande dans le secteur aéronautique est toujours prévue pour les décennies à venir, si bien que les avionneurs ont annoncé des montées en cadences significatives auxquelles les équipementiers devront répondre. Pour y arriver ces derniers vont devoir faire face à deux défis. Le premier est évidemment d'augmenter leur capacité de production. Le deuxième sera d'assurer la maintenance de la flotte actuelle aussi longtemps que possible tout en restant compétitif afin de laisser du temps pour lisser la montée en cadence côté production. De plus, des difficultés touchant l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement se font de plus en plus présentes. Il existe donc un enjeu fort concernant les activités de maintenance qui doivent gagner en efficacité afin de mieux gérer les ressources en réparant tout ce qui peut l'être et en anticipant les commandes de pièces de remplacement au plus tôt du cycle de maintenance. La réalité augmentée, en aidant les opérateurs à prendre des décisions plus fiables et plus rapidement, est identifiée par les industriels comme une technologie clé pouvant apporter une contribution importante pour répondre aux défis actuellement rencontrés par le secteur.

1.3.2. Cycle de vie d'un équipement aéronautique

Le cycle de vie des équipements aéronautiques s'étend de la conception du produit à sa mise hors service définitive, en passant par sa production et son exploitation en service. La conception est réalisée dans des bureaux d'étude sur la base d'un cahier des charges fourni par l'avionneur. De nombreux calculs et simulations sont réalisés afin de définir la structure fonctionnelle et le design de l'équipement. Lorsque tout est bien défini et que les procédés d'industrialisation sont prêts, l'équipement peut passer en production. Dans le cas de Safran cette production est réalisée dans leurs usines OEM (Original Equipment Manufacturer). Le produit est ensuite livré à l'avionneur qui se chargera de son intégration à l'avion.

Les équipements aéronautiques étant complexes et coûteux à concevoir et à produire, leur cycle de vie est prévu pour s'étendre sur une longue durée (on parle de plusieurs décennies). Cette longévité couplée aux exigences de sécurité auxquelles sont soumis ces équipements, imposent un contrôle régulier et approfondi de leur état. L'exploitation d'un équipement aéronautique est ainsi divisée en cycles séparés par une mise en maintenance d'ampleur dans les ateliers de maintenance MRO (Maintenance Repair & Overhaul). La durée de ces cycles d'exploitation peut être définie soit en fonction de la durée de vie globale de l'équipement, soit en nombre de cycles de vol. La Figure 15 illustre le cycle de vie global des équipements aéronautiques ainsi que le cycle d'exploitation en service et de maintenance décrit plus haut.

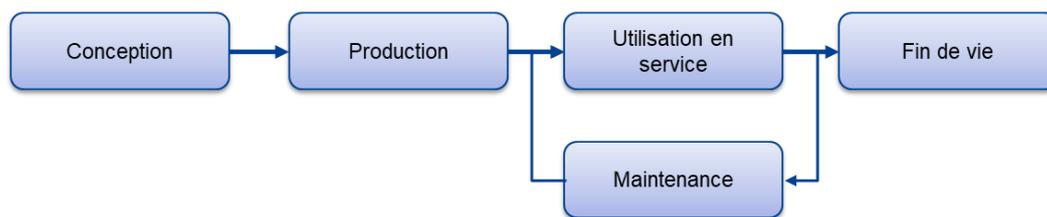


Figure 15 : Cycle de vie d'un équipement aéronautique

1.3.3. Activités de maintenance

Afin de garantir la sécurité des passagers des moyens de transport aérien, différentes autorités de sûreté, telles que l'EASA (European Union Aviation Safety Agency) en Europe ou la FAA (Federal Aviation Administration) aux Etats Unis, veillent au respect des normes de sécurité fixées pour les équipements aéronautiques. Il en découle des contraintes fortes dans le domaine de la maintenance aéronautique. Les procédures d'inspection doivent donc permettre une détection exhaustive des dommages présents sur les pièces. Les procédures de réparation peuvent quant à elles se révéler délicates car les tolérances sont très strictes et précises. Les informations liées à ces procédures sont détaillées dans des documents techniques très complets. Ces documents sont présentés plus en détail dans la section 1.3.4.

La maintenance d'un équipement commence dès sa réception par le centre de maintenance MRO. La première étape du flux de maintenance est l'inspection préliminaire. Cette opération est destinée à l'identification de la configuration reçue et la vérification de sa correspondance avec les informations envoyées par le client. L'opérateur est ici chargé de passer en revue les

références des éléments envoyés par le client et de vérifier que tout est bien présent. Les anomalies de grandes dimensions sont également notées. À l'issue de cette inspection préliminaire, un rapport décrivant l'état général de l'équipement, ainsi que les éventuelles anomalies trouvées à ce stade, est envoyé au client afin d'attester l'état de l'équipement avant la suite des opérations. L'équipement est ensuite intégralement démonté et nettoyé avant d'être envoyé à l'inspection détaillée. Lors du démontage certaines pièces sont systématiquement rebutées car elles sont considérées comme des consommables. C'est par exemple le cas de la visserie et des pièces d'usures. Certaines pièces présentent des couches de traitement telles que la peinture ou les traitements métalliques (chrome, cadmium, zinc+nickel, ...). Cette étape est nécessaire pour pouvoir inspecter les dommages potentiellement présents sous ces couches de traitement.

Chaque petit sous-ensembles ou pièce est ensuite inspecté individuellement à l'aide de moyens de contrôle non destructif (CND). Parmi ces derniers, l'inspection visuelle reste le plus utilisé. Il peut s'agir d'inspection à l'œil nu, de ressuage ou de magnétoscopie. Ces deux dernières techniques sont utilisées pour mettre en valeur les dommages présents sur les pièces. Dans le cas du ressuage, le révélateur est un produit fluorescent observable sous lumière UV tandis que la magnétoscopie utilise les propriétés magnétiques des matériaux constituant les pièces pour révéler les dommages. Ces derniers provoquent des perturbations dans le champ magnétique appliqué à la pièce. Ces perturbations sont alors visualisées en observant des particules métalliques appliquées à la surface de la pièce. Dans le cas de ces trois procédés, l'inspection se fait donc toujours par observation de la surface de la pièce par l'œil de l'inspecteur, c'est pourquoi on parle d'inspection visuelle. D'autres procédés CND plus avancés peuvent également être utilisés tels que les ultrasons ou la thermographie. Lors l'inspections, les dommages sont identifiés, localisés et caractérisés. C'est la conjonction de la localisation et de la caractérisation des dommages qui va permettre à l'inspecteur de prendre une décision sur la suite des opérations à effectuer.

Ainsi, dans les zones les plus critiques, des tolérances sont prévues par la documentation de référence qui autorise ainsi une certaine marge de manœuvre pour effectuer des réparations. Dans le cas où le dommage n'entraîne pas une réparation sortant des tolérances, la pièce est envoyée en réparation. Dans le cas où le dommage est trop important pour être réparé (la réparation conduirait à sortir des tolérances) la pièce est rebutée. Dans certains cas où la

réparation pourrait amener à dépasser légèrement les tolérances, une demande de réparation peut être envoyée au bureau de conception qui sera chargé, après avoir réalisé des calculs plus précis dans la zone concernée, de statuer sur la faisabilité de la réparation. Dans les cas où la pièce peut être réparée, celle-ci est envoyée en réparation puis contrôlée afin de vérifier le bon respect des tolérances.

Une fois toutes les éventuelles réparations effectuées, les traitements de surfaces sont restaurés sur les pièces concernées. Les pièces réparées et celles de rechanges sont ensuite assemblées pour reconstituer l'équipement. Enfin, la maintenance se conclue par une inspection finale afin de vérifier la conformité de l'assemblage obtenu avant de renvoyer l'équipement révisé chez le client. L'ensemble du flux de maintenance décrit dans cette section est rappelé sur la figure suivante.

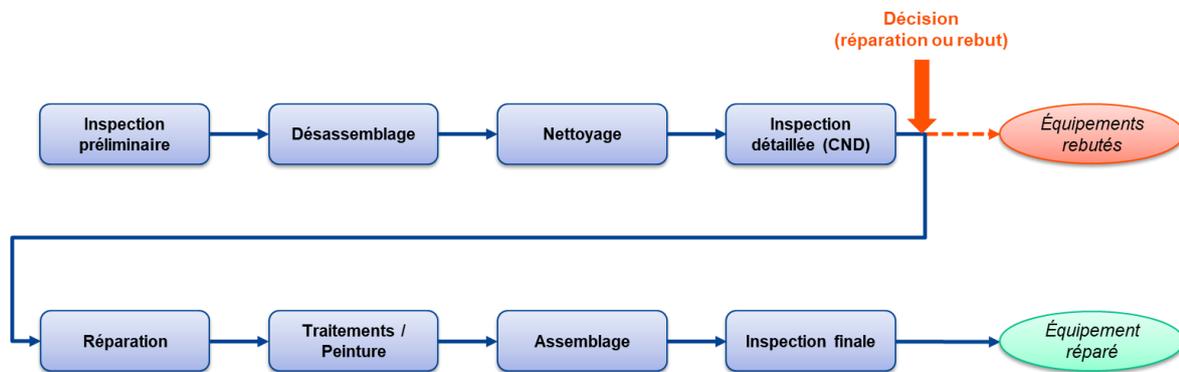


Figure 16 : Flux des opérations dans l'atelier de maintenance

1.3.4. Documentation technique

Les contraintes techniques intervenant dans chacune des étapes du cycle de vie des équipements aéronautiques imposent une rigueur très forte dans la conception et l'exploitation de ces derniers. Il en résulte le besoin d'une documentation à la fois très détaillée et normalisée afin de décrire, de la façon la plus fiable et précise possible, les équipements conçus ainsi que les différents procédés et processus intervenant tout au long du cycle de vie de ces équipements. Dans le domaine de la maintenance, le document de référence est le Component Maintenance Manual (CMM). Ce document regroupe les toutes les informations concernant la nomenclature des équipements aéronautiques. Les opérations de démontage, d'inspection, de contrôle et de remontage y sont décrites. De nombreuses procédures de réparations prévues sont également

incluses. Ce document est parfois complété par des Service Bulletins (SB) qui peuvent être obligatoire ou facultatif. Ces documents décrivent des modifications de configuration ainsi que leur mise en place. En effet la démarche d'amélioration continue entraîne des évolutions des produits qui peuvent alors être imposées aux compagnies aériennes lorsque cela est nécessaire, par exemple pour satisfaire des exigences présentes dans les normes. À l'inverse, certaines améliorations peuvent être facultatives. Ces modifications ne sont pas imposées pour satisfaire des normes et sont proposées comme options aux compagnies aériennes qui le souhaitent.

Cette documentation est très étendue et rédigée exclusivement dans un anglais technique. Les informations présentées sont majoritairement sous forme de texte accompagné de schémas techniques (principalement dans une section dédiée à la nomenclature). Toutes ces spécificités sont autant de contraintes potentielles dans l'exploitation de ces documents de références par les opérateurs. À cela s'ajoute les nombreux renvois à d'autres sections du CMM voire à d'autres documents qui complexifient encore davantage la recherche et la compréhension des informations. Cette complexité allonge donc mécaniquement les temps de cycles des opérations. L'effet est encore plus prononcé pour les opérations les plus complexes comportant des étapes d'analyse et de prise de décision. Cet allongement des temps de cycle peut aussi être fonction du niveau d'expertise de l'opérateur. En effet, les experts ont plutôt tendance à optimiser le temps passé à rechercher les informations en les mémorisant ou en prenant des notes. Il peut cependant en résulter un risque si la documentation vient à évoluer ou si la configuration traitée présente de légères différences avec les produits habituellement traités par l'opérateur.

C'est pour ces raisons qu'il est souvent nécessaire d'adapter cette documentation technique sous forme de gammes de travail plus facilement exploitables en atelier. Toutefois, ces gammes sont bien souvent créées à l'aide de logiciels de traitement de texte ou de présentation, peu propices aux évolutions et demandant encore un effort de contextualisation de la part de l'opérateur pour appliquer correctement les instructions au cas d'usage en cours de traitement. En contextualisant ces informations tenues à jour grâce à la continuité numérique, la réalité augmentée a la capacité de réduire à la fois les temps de cycle et les risques d'erreur d'interprétation des informations.

1.3.5. Enjeux de la maintenance aéronautique

Outre les contraintes de sûreté s'appliquant de façon générale aux équipements aéronautiques et, par conséquent, à l'ensemble des activités s'y rapportant, les activités de maintenance font l'objets d'enjeux plus spécifiques. Le premier est lié aux délais de livraison des équipements maintenus pour leur retour en service au sein de la compagnie aérienne d'exploitation. En effet, un équipement en maintenance signifie que l'avion associé doit rester au sol le temps que cette maintenance soit effectuée. Il est bien évidemment possible que la compagnie aérienne se voit prêter un équipement équivalent pendant la durée des opérations mais cela représente toujours un coût non négligeable. Le flux de maintenance est donc soumis à de fortes contraintes de temps. Pour y répondre, il est important que les opérations effectuées suivent une logique « bon du premier coup » qui cherche à éviter les allers-retours entre les différents acteurs prenant part à la maintenance (inspecteurs, réparateurs, bureau d'études, métrologie, ...) ainsi que la réalisation d'opérations inutiles. Le cas typique étant de réparer un équipement qui doit, finalement, être rebuté.

De plus, certaines tâches spécifiques à la maintenance mobilisent beaucoup de ressources cognitives et de connaissances de l'opérateur. C'est par exemple le cas de l'inspection détaillée des équipements qui fait appel à des capacités d'observation, d'identification, d'évaluation, d'analyse et de décision. Toutes ces capacités sont exigeantes mentalement. À cela s'ajoute le niveau de compétences requis pour mener à bien ce type de tâche avec un niveau de qualité acceptable, tant les exigences du secteur aéronautique sont élevées. De plus, la variabilité des situations traitées rend impossible l'apprentissage théorique de tous les cas de figures. C'est pourquoi l'apprentissage de ce genre de tâches se fait principalement par l'expérience et peut prendre des années avant l'accès au statut d'expert. Aujourd'hui ces compétences sont détenues par des experts possédant des années voire des décennies d'expérience. Il existe donc un enjeu majeur autour de la capitalisation de cette expertise. C'est pourquoi le développement de nouvelles procédures permettant un meilleur transfert des connaissances vers les profils novices est devenu une priorité pour la plupart des acteurs de l'industrie aéronautique.

1.4. Réalité augmentée adaptative

1.4.1. Limites des solutions d'assistance en réalité augmentée standardisées

Comme cela a déjà été évoqué dans la section 1.2.7, les bénéfices de la réalité augmentée appliquée aux opérations de maintenance sont multiples. Par ailleurs, ces résultats ont été démontrés pour divers cas d'application bien que l'assemblage reste le cas d'usage le mieux documenté [25]. De nombreuses études montrent que l'apport de la réalité augmentée peut varier en fonction du profil de l'utilisateur. Ainsi, les profils moins expérimentés montrent des bénéfices plus importants comparés aux experts [37] dont la marge de progression est, en toute logique, plus réduite. Le besoin d'assistance peut alors décroître à mesure que l'utilisateur devient plus expérimenté. Dans ce cas il peut arriver que la charge cognitive soit plus importante en utilisant l'assistance en réalité augmentée. En effet Ariansyah et al. [38] suggèrent que l'utilisation d'un tel système d'assistance puisse induire une charge cognitive supplémentaire pouvant alors conduire à une dégradation des performances pour les profils les plus expérimentés. Les travaux menés par Wickens [39] mettent en avant la limitation des ressources cognitives des utilisateurs. Le Multiple Ressources Model (MRM) développé par Wickens détaille la façon dont ces ressources peuvent être allouées ainsi que les canaux disponibles pour leur utilisation. La réalité augmentée permet d'apporter beaucoup d'informations visuelles qui, si elles sont trop nombreuses, peuvent surcharger le canal visuel et ainsi devenir une source de distraction cognitive [40].

La complexité des tâches traitées a également un impact sur les bénéfices potentiels de l'utilisation de la réalité augmentée sur ladite tâche. Moghaddam et al. [35] expliquent que la réalité augmentée a un impact bénéfique plus important sur des tâches plus complexes. Wiedenmaier et al. [41] ont, d'autre part, trouvé qu'un utilisateur ne tire pas de bénéfices d'instructions de travail en RA si la tâche à effectuer reste trop simple. Radkowski et al. insistent quant à eux sur l'importance de bien évaluer la difficulté des tâches afin de bien choisir le type de représentation des informations présentées au risque de dégrader les performances de l'opérateur [42]. Ce n'est cependant pas le seul critère à prendre en compte car d'autres études contredisent ce principe. Drouot et al. [43] ont comparé, sur deux tâches de complexité différentes, les performances d'opérateurs guidés par la réalité augmentée avec celles obtenues par des opérateurs guidés à l'aide d'instructions numériques sur ordinateur. Les résultats ont

montré une augmentation significative du temps d'exécution pour les opérateurs guidés par la réalité augmentée aussi bien sur la tâche simple que sur la tâche complexe. Une augmentation de la charge cognitive a également été mesurée pour ces mêmes conditions.

Par ailleurs, le niveau d'expertise varie d'un opérateur à l'autre, ce qui implique des besoins d'assistance différents qu'une solution standardisée peut difficilement satisfaire. En effet, une solution standardisée risque de fournir trop d'informations pour les experts tout en n'étant pas assez exhaustive ou détaillée pour les profils moins expérimentés [34].

Toutes ces considérations conduisent ainsi à proposer plus qu'une solution standardisée en considérant les profils des utilisateurs et, de façon plus générale, le contexte dans lequel le système d'assistance se trouve lors de son utilisation afin d'adapter l'assistance fournie. En plus de fournir une aide personnalisée pour les profils les moins expérimentés, Zhu et al. [44] proposent de laisser aux experts la possibilité d'enrichir les procédures à l'aide de leurs connaissances afin de les partager ensuite avec l'ensemble des techniciens.

Les éléments évoqués tout au long de cette section mettent en lumière le besoin de proposer des instructions de travail adaptées à chaque opérateur. Il est alors possible d'imaginer deux façons d'adapter les instructions. La première consiste à concevoir un système avec lequel l'utilisateur peut interagir pour choisir lui-même les éléments ou les paramètres qu'il souhaite utiliser pour travailler. L'adaptation est ici manuelle dans le sens où c'est l'utilisateur qui décide ce qu'il pense être le mieux pour l'assister dans ses activités. Le deuxième type d'adaptation repose sur la capacité de décision du système à sélectionner et diffuser les informations jugées utiles à l'utilisateur de la façon la plus pertinente. Oppermann et al. [45] font ainsi la distinction entre « l'adaptabilité » (« adaptability » dans le texte) où le système n'intervient pas dans le processus d'adaptation et « l'adaptivité » (« adaptivity » dans le texte) où le système est seul maître du processus d'adaptation. Les auteurs décrivent également tout un spectre de systèmes mélangeant ces deux notions. Il est en effet possible d'imaginer différents degrés d'implication de l'utilisateur et du système dans le processus d'adaptation. Ce continuum entre adaptativité et adaptabilité est illustré par la Figure 17.

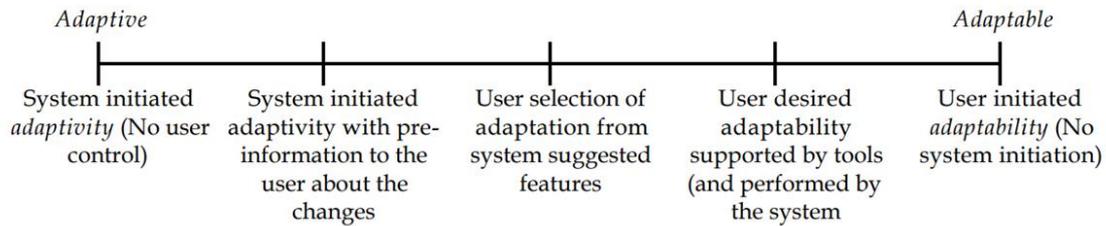


Figure 17 : Continuum adaptivity-adaptability décrit par Oppermann et al. [45]

1.4.2. Engagement de l'utilisateur envers le système d'assistance et la tâche

En plus de varier d'un opérateur à l'autre, le niveau d'expertise de chaque opérateur évolue avec le temps. Pour les opérateurs débutants, ce niveau s'améliore à force d'exécuter la même tâche ou un ensemble de tâches similaires. Ce phénomène, connu depuis longtemps dans le domaine industriel, est à la base de la notion de courbe d'apprentissage [46]. Concernant les experts, si la marge de progression est bien plus faible que pour les profils moins expérimentés, cela ne signifie pas pour autant que leur niveau d'expertise reste statique. En effet, sur certaines tâches complexes et réalisées plus rarement il peut arriver que ce niveau d'expertise se dégrade si le type de tâche en question n'a pas été effectué sur un certain laps de temps [47]. Les opérateurs, quel que soit leur niveau d'expertise, peuvent également être confrontés à de nouvelles références de produits à traiter dont les spécificités peuvent nécessiter des compléments d'information [48]. Par ailleurs, une assistance trop forte pour des experts aura plutôt tendance à devenir une contrainte pour ces derniers tandis qu'à l'inverse, une assistance trop faible ne permettrait pas à un novice de progresser rapidement et efficacement [34]. C'est pourquoi l'objectif d'un système d'assistance adaptative est de garder l'utilisateur dans une Zone d'Engagement Optimale [49]. En effet, une mauvaise gestion des informations délivrées par le système et des interactions avec celui-ci peuvent conduire à une frustration de l'utilisateur. Un désengagement partiel ou complet de l'utilisateur envers le système peut alors se développer et mener à des déviations dans l'utilisation du système voire au refus de l'utiliser [50]. Le niveau d'assistance doit être adapté selon le niveau d'expertise de l'utilisateur tandis que ce niveau d'expertise évolue avec le temps. Il en découle la nécessité d'évaluer régulièrement le niveau d'expertise de l'opérateur afin de pouvoir proposer une assistance justement proportionnée.

Cette notion d'engagement fait l'objet de nombreuses études dans le domaine des jeux vidéo et plus particulièrement dans le sous-domaine des serious games. L'objectif est d'adapter l'expérience de l'utilisateur en fonction de son profil ou de la façon dont il interagit avec le jeu afin d'améliorer son engagement avec ce dernier [51]. L'ajustement de la difficulté du jeu représente un axe de travail important. Il est par exemple possible d'accélérer la vitesse du jeu ou de complexifier les règles [49] afin de garder un certain niveau de difficulté au fur et à mesure que le joueur s'améliore afin de toujours proposer un défi qui ne soit ni décourageant ni ennuyant. La difficulté n'est cependant pas le seul paramètre permettant l'adaptation de l'expérience de jeu. Chrysafiadi et al. [52] proposent de modifier le scénario du jeu en plus de la difficulté en prenant en compte l'état cognitif dans lequel se trouve le joueur.

La gamification des procédures peut d'ailleurs servir à motiver l'opérateur en lui fournissant des retours concernant ses performances et sa progression dans la réalisation de la tâche en cours. La gamification consiste à utiliser des éléments de jeu dans des environnements originellement non ludiques comme l'environnement professionnel. Les retours fournis à l'opérateur dans le cadre de cette démarche de gamification peuvent se baser sur un système de points traduisant les performances de l'opérateur et l'affichage d'une barre de progression permettant d'anticiper la quantité de travail restante. L'attribution des points se fait en fonction de la réussite d'une action et si cette action est réalisée dans un temps imparti [53]. Cette gamification peut tout à fait être couplée à une adaptation des informations afin de démultiplier l'engagement de l'opérateur concernant la tâche effectuée. Ulmer et al. [54] proposent par exemple d'utiliser un système de points et de scores conjointement avec un système de gestion des erreurs permettant de proposer des instructions adaptées et permettant leur résolution.

1.4.3. Propositions de solutions dans la littérature

De nombreuses études suggèrent d'adapter les vecteurs d'information selon les cas d'usages traités ainsi que le profil de l'utilisateur. L'approche proposée par Geng et al. [55] s'appuie en grande partie sur cette variation des vecteurs d'information afin de proposer un contenu adapté au profil de l'utilisateur. Le système décrit associe ainsi chaque vecteur d'information (texte, audio, image, vidéo Modèle 3D, ...) à un niveau d'indication lui-même associé à un niveau d'expertise de l'opérateur (novice, intermédiaire et expert). Les résultats de la mise en

application du système ont montré une très bonne acceptabilité de la part des participants, quel que soit leur niveau d'expertise.

Radkowski et al. [42] expliquent que le type de visualisation des informations devraient tenir compte de la difficulté de la tâche. Ainsi, il est préférable de limiter l'utilisation de modèles 3D à des tâches relativement simples car ce type d'indication visuelle est complexe et nécessite beaucoup de ressources cognitives pour être analysée. À l'inverse on préférera l'utilisation de schémas ou de textes pour les tâches les plus complexes où les informations à analyser peuvent être nombreuses. Toutefois, selon Engelke et al. [56], il faudrait également considérer les préférences de visualisation des utilisateurs.

Ariansyah et al. [38] vont plus loin en s'intéressant au couplage entre les vecteurs d'information et les modalités d'interaction avec le système. La vidéo et l'animation sont les deux vecteurs d'informations étudiés tandis que les deux modalités d'interaction proposées sont la commande vocale et la gestuelle (mouvement des mains). Toutes les conditions d'assistance par réalité augmentée ont montré une amélioration significative des performances (temps de complétion et nombre d'erreurs) et une réduction de la charge cognitive comparativement au groupe de contrôle ayant suivi une procédure de maintenance papier. L'animation s'est révélée être le vecteur d'information pour lequel la réduction du nombre d'erreurs était la plus importante, et cela, quel que soit le mode d'interaction.

Le système CARAGS développé par Wang et al. [57] utilise un bracelet proposant des vibrations, ce qui permet d'offrir un retour à l'utilisateur sans monopoliser davantage de ressources visuelles. L'utilisateur interagit avec le système par la gestuelle, ce dernier étant capable de reconnaître plusieurs actions telles que le zoom, le dézoom ainsi que la translation et la rotation d'éléments 3D. Par ailleurs, le système CARAGS évalue la phase cognitive dans laquelle se trouve l'opérateur afin de proposer le type de contenu le plus adapté à celle-ci. De plus, lorsque plusieurs méthodes de visualisation sont disponibles pour la sous-tâche à effectuer et la phase cognitive associée, l'utilisateur peut sélectionner celle qui lui convient le mieux. Ce système a montré plusieurs bénéfices comparés à une procédure d'assemblage standard mais aussi à un système d'assistance en réalité augmentée plus traditionnel (c'est-à-dire ne prenant pas en compte la phase cognitive dans laquelle se trouve l'opérateur pour adapter le contenu). Le temps d'exécution est ainsi réduit tout comme le nombre de changements d'attention de l'opérateur (déplacement du regard d'une zone d'intérêt à une autre).

Dans la méthodologie proposée par Siew et al. [58], le niveau d'assistance délivré par le système d'assistance en réalité augmentée s'échelonne sur quatre niveaux. Chacun de ces niveaux fournit des informations sous des formes différentes tout en proposant différentes sortes de retours en réponse aux actions de l'utilisateur. Le système conçu et étudié possède deux mécanismes d'adaptation distincts permettant de passer d'un niveau d'assistance à l'autre. Le premier est implicite et utilise les données de suivi du regard de l'utilisateur afin de déterminer le niveau d'assistance à fournir. Le second mécanisme est explicite puisqu'il repose sur la participation de l'utilisateur qui peut demander manuellement à passer d'un niveau d'assistance à l'autre. Tout comme le système CARAGS [57], le système ARMS présenté ici est aussi capable de retours haptiques. En effet, l'utilisateur est équipé d'un bracelet capable à la fois de vibrer et de servir à la localisation du poignet de l'opérateur dans l'espace. Le système est alors capable de détecter la présence du poignet de l'utilisateur dans des zones d'intérêt et de communiquer cette information par retour haptique à l'utilisateur.

Le système d'assistance aux opérations de maintenance développé par Erkoyuncu et al. [59] permet de présenter différentes interfaces en fonction du niveau d'expertise de l'opérateur. La quantité d'information présentée est également ajustée selon ce niveau d'expertise. Ainsi, un opérateur novice devra passer par des étapes de validation supplémentaire afin d'éviter les erreurs. Les résultats montrent une réduction importante du temps d'exécution (temps d'exécution divisé par deux) à l'avantage du système d'assistance en réalité augmentée comparé à l'utilisation du manuel de maintenance papier.

1.4.4. Synthèse

L'utilisation de la réalité augmentée pour l'assistance aux tâches industrielles est un secteur de recherche actif depuis plusieurs décennies. De nombreux bénéfices ont d'ores et déjà été démontrés au travers de nombreuses études. Cependant ces bénéfices ne sont pas systématiques et plusieurs facteurs semblent influencer les résultats obtenus en utilisant la réalité augmentée pour l'assistance aux opérations de production ou de maintenance. Le premier facteur identifié est la complexité de la tâche traitée. En effet, plusieurs études s'accordent sur le fait que la tâche doit atteindre un certain niveau de complexité pour réellement bénéficier d'une assistance par réalité augmentée. Outre cet effet de seuil en dessous duquel la réalité augmentée n'apporte rien, il semble par ailleurs que les bénéfices potentiels de l'utilisation de cette technologie

comme outil d'assistance augmentent en même temps que la tâche se complexifie. Toutefois, certaines études ne vérifient pas cette règle, si bien qu'il semble que d'autres facteurs soient tout aussi déterminant dans l'importance des bénéfices tirés de la réalité augmentée. Il peut même arriver que l'utilisation de la réalité augmentée entraîne une dégradation des performances ainsi qu'une augmentation de la charge cognitive, ces deux éléments pouvant d'ailleurs parfois être corrélés.

Cette augmentation de la charge cognitive peut s'expliquer par une trop grande quantité d'informations visuelles présentées en même temps à l'utilisateur du système d'assistance. La quantité de ressources cognitives étant limitée, présenter une trop grande quantité d'information équivaut donc à mettre le cerveau de l'utilisateur en surcharge ce qui peut ensuite entraîner une baisse des performances incluant aussi bien l'allongement du temps d'exécution que l'augmentation du nombre d'erreurs. Il y a donc un véritable enjeu qui se dégage dans la gestion du contenu délivré par le système d'assistance en réalité augmentée. Cette gestion doit ainsi prendre en compte à la fois les caractéristiques de la tâche à assister mais également les contraintes liées à l'opérateur afin que celui-ci ne se retrouve pas surchargé d'informations. L'enjeu devient donc de présenter assez d'informations pour que l'opérateur puisse facilement effectuer l'opération en cours tout en évitant d'en présenter trop au risque de le surcharger.

Par ailleurs, tout le monde n'a pas besoin de la même quantité d'informations pour mener à bien une tâche précise. En effet, un opérateur novice aura tendance à avoir besoin de davantage d'informations qu'un expert. De plus, le niveau d'expertise de chaque opérateur varie en fonction du temps, à mesure que chacun exécute la même tâche de façon répétée. La variété des situations et des configurations traitées a également un impact sur le niveau d'expertise. C'est par exemple le cas pour les tâches d'inspections qui nécessitent de toujours contextualiser les connaissances et le savoir-faire avec le cas traité afin de réaliser cette opération efficacement. Les opérateurs débutants gagnent ainsi en expertise au fil des opérations effectuées. Les profils plus expérimentés peuvent, quant à eux, perdre un peu en assurance s'ils se retrouvent à traiter un cas auquel ils n'avaient plus été confrontés depuis longtemps. Il est donc nécessaire d'évaluer l'évolution du niveau d'expertise au cours du temps afin de fournir une aide proportionnée au plus juste des besoins de chacun. Bien que ce niveau d'expertise influence grandement les besoins d'assistance, il peut aussi être pertinent de s'intéresser aux préférences des opérateurs pour répondre encore mieux à leurs attentes.

Si l'adaptation de l'assistance en fonction du profil de chacun semble ouvrir la voie à une meilleure gestion de la charge cognitive, et par la même occasion une amélioration des performances, l'intérêt est également de garder l'opérateur engagé vis-à-vis de la tâche mais aussi du système d'assistance lui-même. L'acceptabilité du système s'en trouvera alors améliorée, facilitant ainsi son déploiement et son adoption à plus grande échelle.

Enfin, plusieurs pistes permettant le développement et la mise en œuvre de ce genre de système adaptatifs sont déjà à l'étude dans la littérature. Parmi ces pistes on retrouve l'utilisation de différents types de visualisation de l'information en fonction du profil de l'opérateur. Les indications 3D sont par exemple très explicites, donc adaptées aux débutants, mais gourmandes en ressources cognitives [60] tandis que les informations textuelles sollicitent moins ces ressources mais nécessitent un certain niveau de connaissances et/ou de compétences afin d'être efficaces [55]. Ces informations textuelles seront donc plutôt adaptées aux plus expérimentés. Les modalités d'interaction avec le système peuvent également être utilisées pour différents besoins d'assistance. Il peut s'agir de commande tactile, gestuelle ou encore de commandes vocales. Chacune de ces interactions sollicite les ressources cognitives de l'opérateur de façon différente. De la même façon, le système d'assistance peut fournir différentes formes de retours afin d'améliorer l'engagement de l'opérateur. Des retours visuels, audio et haptiques ont déjà été expérimentés. On peut aussi mentionner le processus de gamification qui permet de gérer les retours de l'opérateur de sorte à traduire ses performances et sa progression à la fois dans l'opération en cours et dans le développement de son niveau d'expertise.

Toujours dans une optique de renforcement de l'opérateur, le système d'adaptation est envisagé par certaines études comme un outil interactif plutôt qu'un simple dispositif diffusant des informations pouvant, par son manque de flexibilité, limiter la façon de réaliser les opérations. C'est dans cette logique que certains systèmes proposés par les chercheurs intègrent une gestion des erreurs tenant compte des actions de l'opérateur. D'autres systèmes permettent à l'opérateur de formuler des requêtes afin de demander plus d'aide au système. Certains mettent en œuvre des systèmes capables de recueillir les remarques et les compléments d'informations fournis par les experts afin de retranscrire, plus tard, ce savoir auprès des moins expérimentés.

En conclusion, l'approche traditionnelle consistant à utiliser la réalité augmentée trouve aujourd'hui ses limites car elle ne permet pas à tous les profils d'expertise d'exploiter tout le potentiel de cette technologie. Il y a donc un vrai besoin de personnaliser à la fois les contenus

délivrés par le système d'assistance en réalité augmentée et la façon dont l'opérateur interagit avec le système. Cependant, il n'existe pas encore d'approche généralisable pour le développement de système d'assistance en réalité augmentée qui prenne en compte à la fois les contraintes liées à l'environnement de maintenance et aux caractéristiques des opérateurs.

Deuxième partie
Problématiques et approche globale

2. Problématiques et approche globale

2.1. Introduction

Tout d'abord précisons ce que nous entendons par « niveau d'expertise de l'opérateur ». Ce niveau d'expertise traduit la vitesse et la facilité avec laquelle l'opérateur parvient à accomplir une opération de maintenance en assurant un niveau de qualité élevé. Le niveau d'expertise se construit sur la base de deux notions en apparence proches mais qu'il est important de distinguer : les connaissances et les compétences. Ces notions ne sont en effet pas directement liées aux mêmes éléments de l'environnement de maintenance. Ainsi les connaissances, d'ailleurs souvent appelées « connaissances produit » dans le secteur de la maintenance industrielle, sont liées aux produits. Ces connaissances sont le fruit de l'assimilation par l'opérateur d'informations liées au produit. Ces informations peuvent concerner la géométrie, les matériaux ou encore le fonctionnement du produit. Les compétences sont, quant à elles, liées aux tâches et traduisent des savoir-faire et l'assimilation de certains processus par l'opérateur. Ces compétences incluent par exemple l'utilisation des outils appropriés pour l'exécution de la tâche, l'application de processus permettant d'évaluer la situation dans laquelle se trouve l'opérateur, de décrire l'état d'un équipement ou de décider de la suite des activités à mener compte tenu des informations contextuelles à disposition. C'est ensuite la mise en œuvre répétée de ces connaissances et de ces compétences à différents ordres de travail, dont les caractéristiques peuvent varier, qui permet d'acquérir de l'expérience et, finalement, d'améliorer le niveau d'expertise global de l'opérateur [47, 61]. La Figure 18 illustre l'interaction entre ces concepts. Notons qu'en plus de varier d'un individu à l'autre, l'acquisition de l'expérience varie aussi en fonction de la répétabilité des tâches considérées. En effet, une tâche d'assemblage est particulièrement répétable car les éléments d'un assemblage, ainsi que la séquence à suivre pour obtenir celui-ci, sont bien définis pour un produit donné (bien que les configurations possibles tendent à se diversifier). À l'inverse, les ordres de travail pour une tâche d'inspection ne seront jamais identiques car chaque équipement possède un historique et des conditions d'utilisation différents. Il est donc nécessaire de traiter

un nombre bien plus important d'ordres de travail avant d'avoir un bon aperçu des différents cas de figure et d'ensuite espérer être familier avec ces derniers.

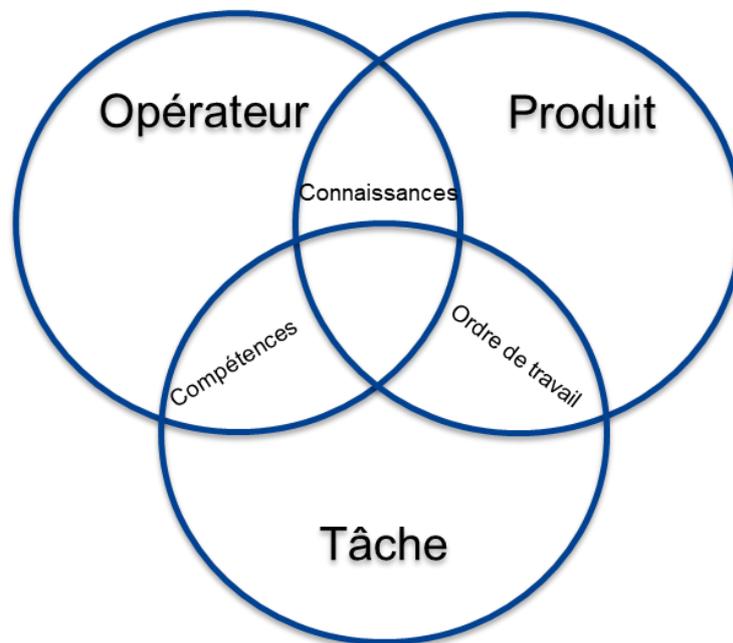


Figure 18 : Distinction entre connaissances et compétences

L'objectif du système d'assistance adaptative est double. Il doit permettre à la fois d'adapter les instructions de travail en fonction du profil d'expertise de chacun mais il doit également être capable de suivre l'évolution des caractéristiques d'un opérateur donné. Il est donc nécessaire d'évaluer ces caractéristiques à une fréquence élevée. Cette fréquence peut être de l'ordre du temps d'exécution d'une tâche, voire d'une action. Pour les profils les moins expérimentés l'évolution du niveau d'expertise se fait en général à la hausse, au fur et à mesure que l'opérateur gagne en expérience en pratiquant. En effet, si une formation est initialement bien dispensée avant que l'opérateur puisse travailler en conditions réelles, celui-ci continue d'améliorer ses compétences et de compléter ses connaissances en traitant des ordres de travail. Cependant l'évolution du niveau d'expertise ne se fait pas toujours à sens unique et il peut arriver qu'elle diminue légèrement avec le temps. Ce processus n'a rien d'anormal car il fait partie du processus d'apprentissage à long terme [47]. S'il est plus facilement observable chez les profils les moins expérimentés toujours en cours d'apprentissage, il peut également se manifester chez les opérateurs plus expérimentés qui ne pratiqueraient pas pendant une longue période. Il peut alors être intéressant de faire des rappels pour aider l'opérateur à recouvrer son niveau d'expertise maximal précédemment atteint. Ainsi, bien qu'il soit vrai qu'un expert

possède une marge de progression plus faible qu'un profil moins expérimenté, cela ne signifie pas pour autant qu'il ne faut pas surveiller un changement potentiel de son niveau d'expertise.

Un autre cas de figure pouvant nécessiter l'adaptation du niveau d'assistance à fournir est celui où l'opérateur se retrouve confronté à un produit qu'il n'a pas l'habitude de traiter. En effet, en maintenance, certaines séries traitées peuvent être anciennes et avoir été produites en très petites quantités. Dans ce cas, même si l'opérateur est déjà expérimenté dans la tâche concernée (bon niveau de compétences), c'est au niveau des connaissances qu'il faudra ici l'assister. Il peut, par exemple, être alors nécessaire de fournir les informations sous une forme plus simple à traiter car celles-ci seront plus nombreuses.

Le cas inverse, pour lequel l'opérateur conserve un niveau de connaissances quasiment identique mais se retrouve avec un niveau de compétences plus faible, peut aussi se poser. En effet, les ateliers de maintenance tendent aujourd'hui à disposer d'une main d'œuvre plus polyvalente afin de gagner en flexibilité sur l'organisation du traitement des opérations. Ainsi, un opérateur peut se retrouver à devoir traiter de nouvelles tâches sur un produit qu'il connaît déjà bien. Bien que les tâches en question présentent en général des similarités (par exemple entre l'assemblage et le démontage) certains points de vigilance ou spécificités peuvent exister et mériter d'être expliqués plus en détail.

Par ailleurs, bien que cela ne soit pas directement lié au niveau d'expertise de l'opérateur, le système d'assistance adaptative devrait être en mesure de fournir des alertes lorsqu'il y a une évolution de la procédure et que l'opérateur n'en a pas encore été informé. De manière générale, tout changement lié à une évolution du produit maintenu ou de la procédure associée à la tâche pouvant faire l'objet d'une alerte ou d'un petit module de formation doit être dispensé aux opérateurs qui se retrouvent confrontés pour la première fois à ces changements.

Enfin, outre les compétences et les connaissances dont dispose l'opérateur, celui-ci possède généralement des préférences de travail. En adaptant la procédure d'assistance au mode de travail de chacun, le système d'assistance adaptatif pourrait aller encore plus loin dans la gestion de la charge cognitive, ce qui pourrait être bénéfique pour l'engagement et l'acceptabilité de l'opérateur envers le système lui-même.

2.2. Problématiques et questions de recherche

Comme nous l'avons vu dans les sections 1.2 et 1.4, bien que la réalité augmentée ait déjà montré de nombreux bénéfices, la standardisation des contenus de réalité augmentée destinés à l'assistance des opérateurs en milieu industriel présente des limites liées à l'incapacité de prendre en compte les différents besoins de chacun. Certains systèmes capables de proposer différents types de scénarios en fonction du profil d'expertise (ex : novice, intermédiaire ou expert) de l'utilisateur ont été proposés dans la littérature. Si les études présentent souvent des résultats intéressants en termes d'expérience utilisateur, d'acceptabilité et d'engagement [62], l'impact sur la charge cognitive ainsi que les performances sont plus rarement évalués. Or, la limitation des ressources cognitives disponibles pour chacun implique qu'une augmentation de la charge cognitive peut avoir un impact non négligeable sur les performances. L'apport de la réalité augmentée par rapport au support papier étant déjà bien connu et mesuré (voir section 1.2.7), nous ne cherchons plus seulement à proposer une alternative à ce support mais nous essayons également d'améliorer l'assistance qu'il est possible de proposer grâce à la réalité augmentée. Il serait donc pertinent d'évaluer dans quelle mesure l'ajout d'adaptation à un système d'assistance en réalité augmentée modifie les résultats obtenus par l'utilisation du système ainsi modifié. Cela nous amène à une première question de recherche que nous évaluerons de manière expérimentale.

Q1 : L'adaptation des contenus a-t-elle un impact sur la charge cognitive et sur les performances de l'opérateur comparée à une assistance en réalité augmentée non-adaptative ?

Le qualificatif « non-adaptative » désigne l'invariabilité du contenu proposé qui est défini une fois pour l'application ou la tâche ciblée par l'assistance. Ce terme met donc en opposition le caractère non-adaptatif d'un système d'assistance en réalité préexistant avec l'adaptation délivrée par le système d'assistance adaptative proposé et évalué.

Comme le montre la diversité des solutions conçues et/ou mises en œuvre dans la littérature [38, 42, 55, 57, 58], il n'existe pas une seule façon d'apporter de l'adaptation aux systèmes d'assistance en réalité augmentée. Comme nous le verrons plus en détails dans cette partie, la conception d'un système capable d'adapter les contenus de réalité augmentée en fonction des performances et des préférences des utilisateurs fait intervenir de nombreux paramètres. En effet, outre les variables mesurées pour l'évaluation des performances et des préférences des

utilisateurs, la conception d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée est aussi influencée par la tâche ciblée par ladite assistance, par les contraintes exercées par l'environnement de maintenance ou encore le matériel utilisé pour mettre en œuvre le système. Bien que la littérature donne un bon aperçu des caractéristiques pouvant varier d'un système à l'autre, les solutions proposées sont rarement comparées entre elles afin d'évaluer d'éventuelles différences d'impact sur les performances et la charge cognitive des utilisateurs. La différence fondamentale entre ces différents systèmes réside dans la stratégie d'adaptation employée pour faire le lien entre des informations associées à l'utilisateur en entrée (profil d'expertise, temps d'exécution, état cognitif, etc. ...) et les contenus adaptés délivrés par ces systèmes. Nous proposons donc de concevoir des systèmes d'assistance adaptative reposant sur les mêmes fondements et la même implémentation matérielle mais utilisant des stratégies d'adaptation différentes afin de vérifier si l'impact sur les performances et la charge cognitive des utilisateurs est différent d'un système à l'autre. Notre deuxième question de recherche est donc la suivante :

Q2 : L'impact du système d'assistance adaptative sur les performances et la charge cognitive de l'opérateur diffère-t-il selon la stratégie mise en place pour adapter les contenus ?

Concernant les données d'entrée du système d'assistance adaptative, plusieurs études se basent sur une compréhension du déroulé de la tâche [44]. D'autres proposent d'intégrer les performances et les préférences de l'opérateur pour adapter les informations fournies par le système [55]. Dans de plus rares cas le processus cognitif de l'utilisateur lors de l'exécution de la tâche peut également être pris en compte pour décider de la façon dont les informations sont présentées en fonction de l'état cognitif dans lequel se trouve l'utilisateur à un moment donné [57]. Certains suggèrent de considérer également les préférences de l'utilisateur afin de préserver son engagement vis-à-vis de l'utilisation du système [56]. Cependant, l'inclusion des préférences en tant que donnée pilote de l'adaptation reste peu étudiée du point de vue de son impact sur la charge cognitive de l'utilisateur. Si l'on peut faire l'hypothèse d'une diminution de cette charge cognitive lorsque l'utilisateur a plus de liberté dans la façon d'effectuer la tâche, il faut néanmoins vérifier à ce que cette liberté ne vienne pas dégrader les performances de l'utilisateur. Cette réflexion est synthétisée par la question de recherche suivante :

Q3 : La prise en compte des préférences des opérateurs permet-elle de diminuer leur charge cognitive sans nécessairement dégrader leurs performances ?

Enfin, rappelons plusieurs constats faits à la suite de la revue de la littérature sur l'assistance adaptative en réalité augmentée. Les systèmes proposés dans les différentes études précédemment réalisées ne partagent pas la même base conceptuelle permettant de les comparer entre eux et notamment leur impact sur les performances et la charge cognitive de l'utilisateur. En effet la variété de concepts, des solutions logicielles et de solutions matérielles explorées dans la littérature complique l'agrégation et la comparaison des bénéfices et des limitations de chaque proposition. Il existe donc un besoin de structurer le concept de système d'assistance adaptative en réalité augmentée. Cette structure pourrait servir de base pour mieux différencier ce qui a déjà été étudié de ce qui reste à explorer afin de capitaliser les bénéfices déjà observés dans certains cas et de combler les limitations subsistantes. La méthodologie que nous proposons dans la partie suivante se veut être une première réponse à ce besoin. De plus, cette méthodologie est également destinée à la fois à la conception, à l'évaluation et au transfert en atelier de solutions d'assistance adaptative en réalité augmentée. Cette méthodologie devra ainsi répondre à la question suivante :

Q4 : Comment définir et mettre en œuvre une procédure d'assistance en réalité augmentée adaptée aux caractéristiques de l'opérateur ?

Cette dernière question reste assez vaste, c'est pourquoi pour y répondre nous nous intéressons à deux sous questions un peu plus précises. La première concerne les caractéristiques de l'opérateur à considérer dans le contexte d'adaptation aux besoins de chacun. En effet, avant de pouvoir adapter les contenus destinés à assister les opérateurs, le système d'assistance doit être capable de s'appuyer sur des paramètres mesurables lui permettant de différencier les besoins des différents opérateurs. C'est pourquoi nous proposons d'étudier la sous-question suivante :

Q4.1 : Quelles sont les caractéristiques de l'opérateur à prendre en compte pour adapter l'assistance à ses besoins ?

Comme nous le verrons dans les sections suivantes, l'environnement de maintenance est un système complexe faisant intervenir un ensemble d'éléments interagissant entre eux. L'assistance aux opérations de maintenance, et en particulier le système chargé de délivrer cette assistance, doivent donc être capable de s'intégrer dans cet environnement en prenant en compte ses spécificités. La sous-question découlant de ce point est la suivante :

Q4.2 Quels critères et caractéristiques de l'environnement de maintenance doivent être considérés lors de la conception d'un système de réalité augmentée capable de délivrer une assistance adaptée aux caractéristiques de l'opérateur ?

Troisième partie

Méthodologie pour la modélisation, la
conception, et l'exécution d'un système
d'assistance adaptative en réalité augmentée

3. Méthodologie pour la modélisation, la conception et l'exécution d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée

3.1. Vue d'ensemble

Dans ce chapitre nous proposons une méthodologie permettant de modéliser, concevoir, et exécuter un système d'assistance aux opérations de maintenance basé sur la réalité augmentée. Cette méthodologie est destinée à la fois à l'élaboration de supports expérimentaux permettant de répondre aux questions de recherche identifiées dans la section 2.2, mais aussi à la généralisation à l'ensemble des opérations de maintenance de la conception d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée baptisé ARAAS pour Augmented Reality-based Adaptive Assistance System. La démarche proposée ici est composée de trois couches :

La première couche (couverte par la section 3.2) est une première partie théorique faisant tout d'abord l'inventaire des éléments ajustables dans les procédures d'assistance ainsi que dans le système d'assistance lui-même afin de proposer une assistance adaptée aux caractéristiques de l'opérateur. Cette partie s'attarde également sur l'ensemble des indicateurs potentiellement utilisables pour mesurer et évaluer les caractéristiques de l'opérateur, c'est-à-dire ses performances, sa charge cognitive et ses préférences de travail.

La deuxième couche (couverte par la section 3.3) traite de la conception et la mise en œuvre d'un système d'assistance adaptative pour un cas d'usage cible. Cette partie fournit des éléments permettant d'identifier les contraintes liées au cas d'usage et à l'environnement de maintenance pouvant intervenir dans les choix de conception du système d'assistance. Le processus détaillé dans cette partie s'appuie sur une description de l'opération de maintenance cible (aussi appelée cas d'application ou cas d'usage) faisant intervenir les notions définies au sein de la première couche de la méthodologie. Un exemple de cas d'usage d'aide à la décision lors de l'inspection sera donné en section 4.2 afin d'illustrer l'application des concepts intervenant dans cette deuxième couche de la méthodologie.

Enfin, la troisième couche (couverte par la section 3.4) traite simplement de l'exécution du système d'assistance adaptative aux opérations de maintenance en réalité augmentée. Cette couche décrit les composants du ARAAS ainsi que la façon dont ils interagissent entre eux pour délivrer une assistance adaptée aux caractéristiques des opérateurs.

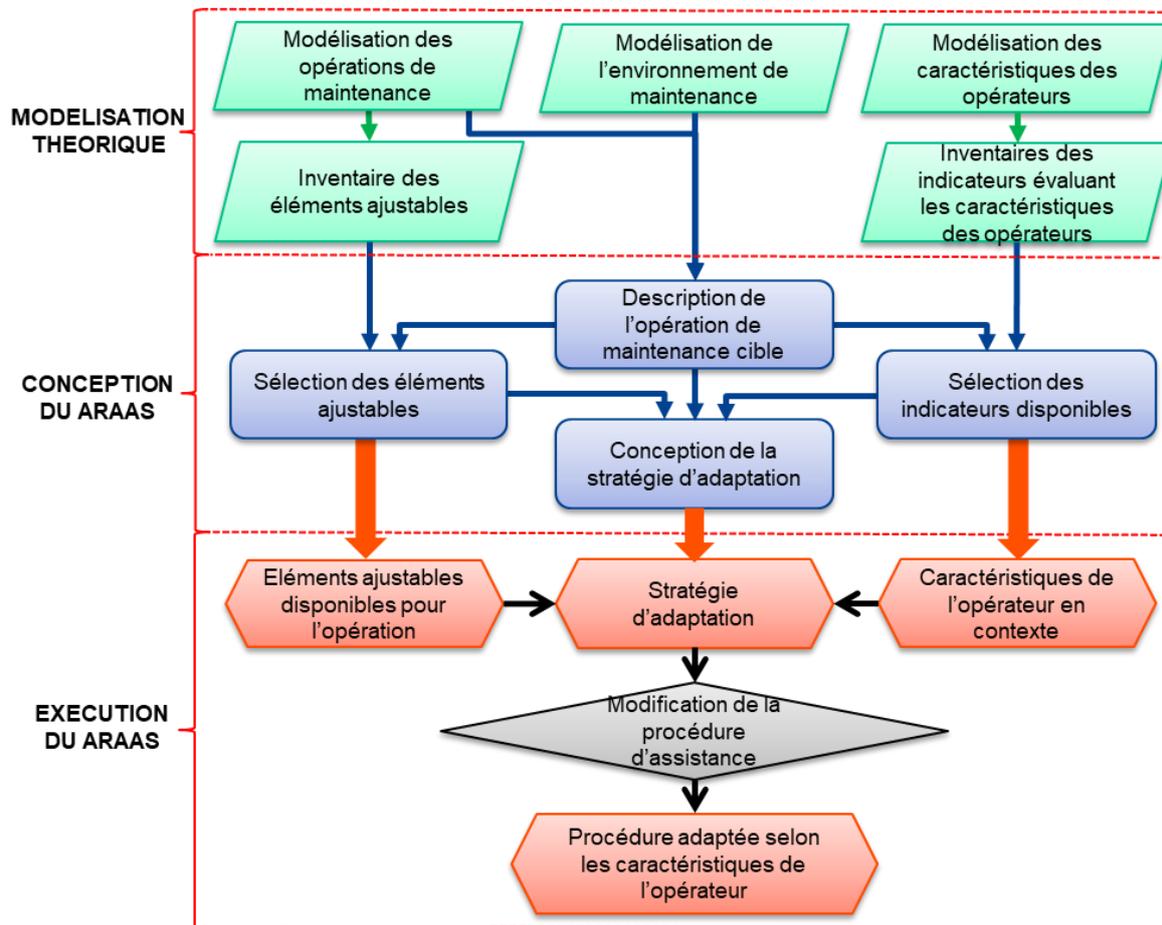


Figure 19 : Vue d'ensemble de la méthodologie pour la modélisation, la conception et l'exécution d'un système d'assistance adaptative de réalité augmentée pour les opérations de maintenance

3.2. Modélisation théorique

3.2.1. Opérations de maintenance

Une opération de maintenance est constituée d'un ensemble d'activités, elles même constituées d'un ensemble de tâches. Dunston et Wang [63] distinguent les tâches composites et les tâches primitives. Comme leur nom l'indique, les tâches composites sont composées de tâches primitives. Ces dernières s'apparentent à des actions élémentaires telles que « déplacer », « attraper » ou « atteindre ». Ces actions sont élémentaires dans le sens où elles ne sont pas spécifiques à un type d'opération précise et permettent, une fois combinées, de contribuer à l'exécution de tâches plus complexes. Les tâches composites résultantes de la combinaison de ces actions sont à leur tour organisées sous forme de séquence et constituent, de cette façon, une opération de maintenance. Afin d'éviter toute confusion entre les tâches composites et les tâches primitives, nous adopterons dans la suite de ce manuscrit les dénominations de « tâches » pour les tâches composites et « actions » pour les tâches primitives. Cette décomposition des opérations de maintenance et de ses composants est schématisée par la

Figure 20.

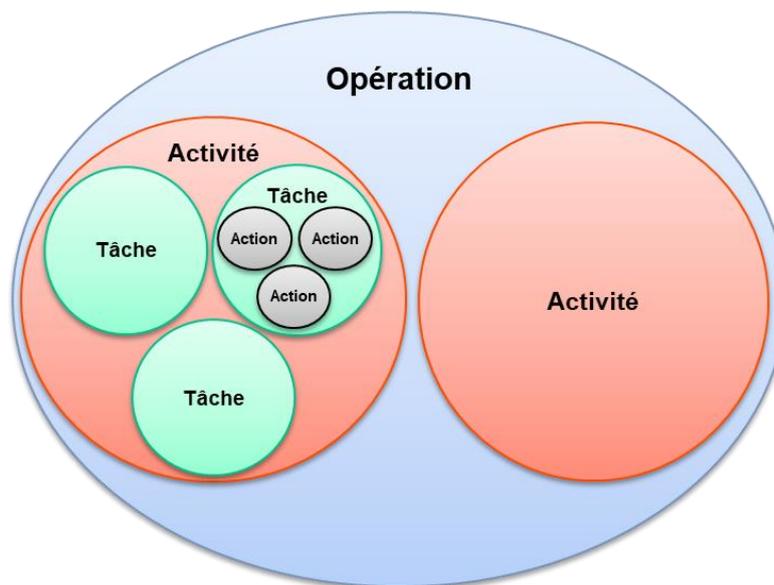


Figure 20 : Décomposition d'une opération de maintenance basée sur la hiérarchie décrite par Dunston et Wang [63]

Parmi les tâches composant une activité il est possible d'en distinguer de différentes natures. Sur la base des travaux de Proctor et Van Zandt [64], Dunston et Wang [63], distinguent en effet les tâches perceptuelles (détecter, observer, localiser, identifier, ...), les tâches cognitives (calculer, catégoriser, analyser, comparer, ...) ainsi que les tâches motrices (activer, connecter, aligner, tenir, ...). La réalité augmentée permet d'assister sur les tâches perceptuelles et cognitives. Le Tableau 1 fourni des exemples d'opérations de maintenances, d'activités, de tâches et d'actions. Cette liste non exhaustive permet de mieux distinguer les différents niveaux des éléments composants une opération de maintenance.

Opérations de maintenance	Inspection initiale, Nettoyage, Démontage, Inspection détaillée, Réparation, Traitement de surface, Peinture, Assemblage, Inspection finale
Activités	Inspection, Assemblage, Planification
Tâches	Identifier, Localiser, Sélectionner, Annoter, Connecter, Mesurer, Noter
Actions	Déplacer, Saisir, Bouger les yeux

Tableau 1 : Exemples d'opérations de maintenance et de leurs composants

3.2.2. Environnement de maintenance

L'environnement de maintenance est l'espace de travail dans lequel sont exécutées les opérations de maintenance. Plusieurs éléments sont à prendre en compte dans le contexte de l'assistance aux opérations de maintenance. Ainsi, en plus des opérations de maintenance et des opérateurs, il est important de considérer le produit sur lequel ces opérations sont réalisées ainsi que les outils utilisés dans ce contexte. Tous ces éléments composant l'environnement de maintenance peuvent avoir un impact sur le développement du ARAAS. Les sous éléments composant une opération de maintenance, notamment les tâches et les actions, exercent une influence directe sur le type d'information nécessaire à leur bonne exécution. Concernant le produit sur lequel l'opérateur intervient au cours d'une opération de maintenance, certaines caractéristiques telles que les dimensions de ce produit, le nombre d'éléments le constituant ou encore le nombre de zones d'intérêt présentes, peuvent impacter les bénéfices apportés par la réalité augmentée [37]. Sur la base des travaux de Quentin Loizeau [65], nous avons donc

identifié les caractéristiques pouvant avoir une incidence sur le développement d'un système de réalité augmentée pour l'assistance adaptative aux opérations de maintenance. Ces caractéristiques, ainsi que les niveaux pris par ces dernières, sont présentées dans le Tableau 2. De plus, l'évaluation de ces caractéristiques permet d'entrevoir plus facilement la complexité des opérations et donc de mieux évaluer l'apport potentiel de la réalité augmentée dans le contexte considéré.

Caractéristiques	Type / Niveaux
Nombre de tâches	Nombre entier
Nature des tâches	Voir Tableau 1
Nombre d'outils	Nombre entier
Nombre de pièces à identifier	Nombre entier
Nombre de zones d'intérêt	Nombre entier
Nombre de pièces à manipuler	Nombre entier
Dimensions du produit	Très petit (peut être tenu dans une main) Petit (peut être tenu à deux mains) Moyen (ne peut pas être tenu) Grand (navigation autour du produit requise) Très grand (navigation à l'intérieur du produit requise)
Utilisation des mains	Aucune Une main utilisée Deux mains utilisées

Tableau 2 : Caractéristiques des éléments de l'environnement de maintenance ayant un impact sur l'assistance en réalité augmentée

L'opérateur est au centre de l'environnement de maintenance. Lors de l'exécution d'une opération de maintenance, celui-ci est amené à travailler sur un ou plusieurs produit/équipement. Ce produit peut être une pièce, un sous-ensemble ou un assemblage complet constituant alors un équipement de maintenance complet. Ce produit possède des caractéristiques pouvant intervenir dans les choix de conception du système d'assistance aux opérations de maintenance. Par exemple, les dimensions du produit vont inévitablement conditionner le type de dispositif utilisé pour délivrer les informations en réalité augmentée. En effet s'il est possible d'utiliser une station fixe composée d'un écran et d'une caméra montée

sur flexible pour les petites pièces et sous-ensembles, ce genre de dispositif devient rapidement trop contraignant lorsque le produit est plus grand. Dans ce cas il est alors préférable d'opter pour une solution mobile comme une tablette, une station mobile ou un visiocasque. La géométrie du produit peut également restreindre le choix du dispositif de réalité augmentée. Les systèmes projectifs (projetant les informations virtuelles directement à la surface du produit) sont particulièrement sensibles à cette contrainte. En effet, si la surface du produit est trop complexe (présences d'alésages profonds, alternance de zones concaves et convexes, ...) la représentation des informations virtuelle sera trop déformée voire impossible à projeter. La géométrie du produit ou sa configuration lorsqu'il s'agit d'un assemblage, peut aussi induire des problématiques d'accessibilité et, par conséquent, des contraintes supplémentaires au niveau du moyen de capture de l'environnement réel. Un élément à inspecter au sein d'un assemblage complexe de grandes dimensions peut par exemple se trouver dans une zone trop exigüe pour y passer la tête, ce qui empêchera toute utilisation de visiocasques. On privilégiera alors le recours à une caméra déportée de l'écran permettant de visualiser le contenu de réalité augmentée.

Outre le produit concerné par l'opération de maintenance considérée, l'opérateur peut aussi être amené à manipuler divers outils pour mener à bien ladite opération. Ces outils peuvent être standards ou spécifiques, voire de conception artisanale pour les séries de produits les plus petites ou les plus anciennes encore maintenues. Certaines tâches ne requièrent quant à elles aucun outil, l'opérateur n'utilisant dans ce cas que ses mains et ses yeux pour interagir avec le produit maintenu. Les opérations nécessitant une utilisation régulière des mains pour manipuler le produit ou les outils poussent ainsi à s'orienter vers l'utilisation de solutions de réalité augmentée dites « mains libres » pouvant intégrer la commande vocale afin d'interagir avec le système sans autre manipulation. A l'inverse les tablettes ou les dispositifs avec caméra déportée tenue à la main sont à éviter pour ce genre de cas d'usage. La conception d'un système d'assistance en réalité augmentée doit donc prendre en compte à la fois les contraintes induites par les caractéristiques de du produit maintenu ainsi que les outils impliqués et leurs modalités d'utilisation lors de l'opération de maintenance considérée.

3.2.3. Caractéristiques de l'opérateur

Lorsque l'on considère l'opérateur intervenant sur un produit lors d'une opération de maintenance, il est indispensable d'identifier les caractéristiques de cet opérateur dans ce contexte de travail si l'on veut pouvoir adapter les informations fournies en fonction du profil de chacun. Les caractéristiques de l'opérateur ainsi considérées sont les suivantes : ses performances, ses préférences et sa charge cognitive. Chacune de ces caractéristiques est en lien avec les autres éléments de l'environnement de maintenance. Ces trois caractéristiques sont toutes susceptibles de piloter l'adaptation des contenus délivrés par le système d'assistance adaptative.

Performances

Les types de performances évaluées en milieu industriel sont le temps de réalisation et la qualité de la tâche effectuée. Les indicateurs utilisés pour évaluer ces deux composantes sont le temps d'exécution et le nombre d'erreurs. Pour une tâche donnée, en connaissant les performances obtenues par les experts, il est possible d'utiliser ces résultats comme référence afin de comparer les performances d'autres opérateurs et, ainsi, de les positionner par rapport aux experts. Cela permet d'estimer le niveau d'expertise sur la tâche réalisée.

Charge cognitive

La charge cognitive traduit à quel point l'opérateur est sollicité lorsqu'il réalise une tâche. S'il est généralement vrai que cette charge augmente au fur et à mesure que les tâches considérées se complexifient, ce n'est pas le seul facteur à prendre en compte. En effet, chacun est différent face à une tâche à réaliser. De nombreux facteurs influencent la charge cognitive de l'opérateur, tels que son expérience, ses compétences, ses connaissances ou encore sa condition physique. La mesure de cette charge cognitive permet donc de capturer plus en détail le niveau d'expertise et la façon de travailler de chacun. Certaines études vont même jusqu'à considérer l'ensemble du processus cognitif de l'opérateur dans le but d'anticiper l'évolution des besoins d'assistance au cours de l'exécution d'une tâche [38].

Préférences

Enfin, les préférences de l'opérateur sont variées. Il peut s'agir de préférences de travail liées au découpage de l'opération : un opérateur peut, par exemple, préférer traiter toutes les tâches de même nature ensemble avant de traiter les tâches d'une autre nature ou bien alterner entre ces deux types de tâches afin en les traitant dans l'ordre dans lesquels elles se présentent à lui. Afin d'illustrer cet exemple, considérons l'inspection d'un assemblage composé de nombreuses pièces. L'opérateur doit vérifier que chaque pièce est bien présente sur l'équipement inspecté (tâche A) et, pour chaque pièce, il doit relever son numéro de série (tâche B). Dans ce cas l'opérateur peut soit, pour chaque pièce, vérifier sa présence sur l'équipement et relever son numéro de série, soit vérifier la présence de toutes les pièces puis relever tous les numéros de série. Un autre type de préférences concerne les modes d'information utilisés. Certains opérateurs vont préférer recevoir les informations sous forme de texte, d'image, de vidéo ou encore d'instructions audio. Les modalités d'interaction avec le système d'assistance peuvent aussi faire l'objet de préférences de la part des opérateurs. Certains peuvent par exemple préférer interagir en utilisant la gestuelle tandis que d'autres préféreront l'utilisation de commandes vocales. Comme pour toute interface homme machine numérique, l'opérateur peut également manifester des préférences dans l'utilisation des différentes fonctionnalités offertes par le système. Plusieurs approches ergonomiques (disposition de l'interface, navigation entre les différents écrans de l'application d'assistance, etc. ...) peuvent être proposées à l'opérateur afin que celui-ci puisse travailler avec celle qui lui convient le mieux. De façon plus générale, l'analyse de l'activité de l'opérateur au sein du système d'assistance permet d'identifier les éléments clés.

Synthèse

Comme nous le verrons plus en détails par la suite, la mesure des performances et l'évaluation de la charge cognitive permettent aussi de caractériser et quantifier l'apport de la solution d'assistance adaptative. En effet, on cherche, par cette adaptation, à minimiser à la fois le temps d'exécution, la non-qualité exportée ainsi que la charge cognitive de l'opérateur. Il est également souhaité de prendre en compte les préférences des opérateurs [56] car satisfaire ces dernières peut entraîner une amélioration supplémentaire d'un point de vue des performances et de la charge cognitive. Les éléments de l'environnement de maintenance abordés jusqu'ici, ainsi que les relations existantes entre elles, peuvent être représentées sous la forme d'un graphe d'ontologie (Figure 21). Cette représentation permet de mieux visualiser les interactions

pouvant avoir un impact sur l'adaptation des contenus à fournir pour assister au mieux les opérateurs dans leurs opérations.

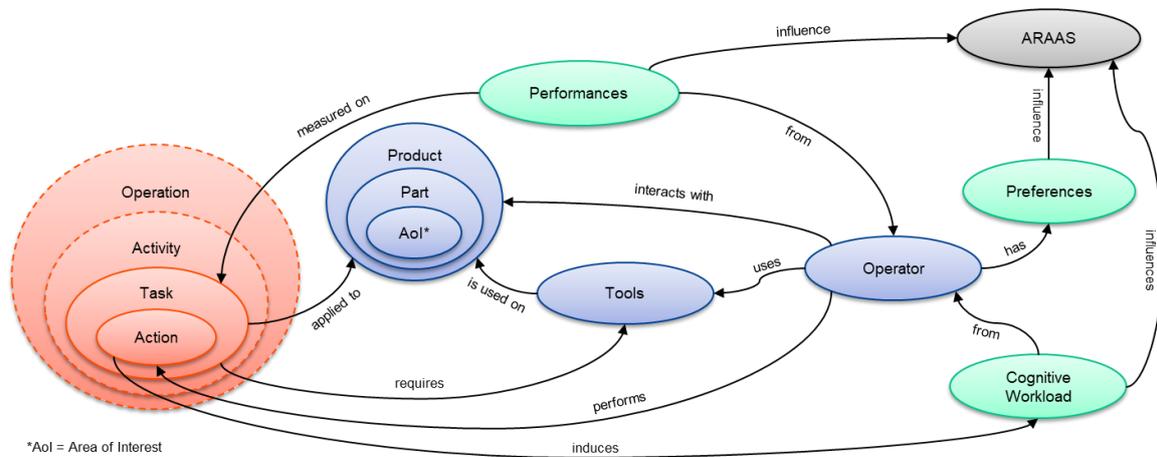


Figure 21 : Ontologie de l'environnement de maintenance assisté

3.2.4. Inventaire des éléments ajustables de l'assistance

Avant de pouvoir adapter une procédure aux besoins d'un opérateur, il est primordial d'identifier les éléments de ladite procédure qu'il est possible de modifier sans pour autant altérer les informations absolument nécessaires pour mener à bien l'opération de maintenance. Outre ces éléments composant la procédure, certains paramètres propres au système d'assistance adaptative peuvent être modifiés afin de mieux répondre aux préférences de l'opérateur. L'ajustement de ces éléments peut être vu comme un ensemble de paramètres intervenant dans le réglage de l'assistance.

Ce sont, en effet, ces éléments que le système d'assistance va venir modifier en fonction des caractéristiques de l'opérateur identifiées lors de l'exécution de la tâche. L'inventaire de ces éléments modifiables lors de l'exécution des différentes tâches est le point de départ de la démarche d'assistance adaptative [49].

Informations délivrées par le système

Parmi les éléments ajustables d'une procédure d'assistance, nous retrouvons tout ce qui concerne la façon de transmettre les informations nécessaires ou facilitant l'exécution de la tâche.

Modes d'information :

De nombreuses études se sont déjà attardées sur l'utilisation de différents modes d'informations, que ce soit pour étudier la pertinence d'un de ces modes par rapport à l'autre [38] ou bien pour ajuster le mode d'information en fonction du niveau d'expertise de l'opérateur [55].

Les modes d'information utilisés pour véhiculer l'information jusqu'à l'utilisateur sont bien entendu critiqués pour la compréhension. Certains préféreront se référer à des schémas techniques pour vérifier les zones d'interventions quand d'autres auront d'abord besoin de visualiser les gestes à effectuer de façon plus explicite. Cet élément ajustable est souvent utilisé en corrélation avec un niveau d'expertise évalué pour la tâche [55]. Le Multiple Resources Model présenté par Wickens [39] montre que les informations visuelles et audio sont traitées de façon relativement indépendante via deux canaux dédiés. Une astuce permettant d'éviter une surcharge cognitive de l'opérateur consiste donc à distribuer les informations par les deux canaux au lieu, par exemple, d'encombrer le canal visuel pouvant être rapidement fortement sollicité par la réalité augmentée. Plusieurs classifications de ces modes d'information ont déjà été présentées dans la littérature. Li et al. [66] associent les différents modes d'information à des fonctions distinctes. Une image est ainsi plutôt destinée à fournir des informations sur une tâche d'assemblage tandis que les modèles 3D statiques sont utilisés pour fournir des informations au sujet du produit ou des outils. L'ajustement de ces modes visuels est souvent utilisé par les systèmes présentés dans la littérature. Geng et al. [55] proposent par exemple d'associer chaque mode d'information à un niveau d'expertise.

Apparence des informations :

L'apparence des informations vues par l'intermédiaire du système de d'assistance en réalité augmentée a également un impact sur les performances de l'opérateur [67]. Il est peut donc être intéressant, selon les conditions de travail et les préférences de l'opérateur, d'ajuster la taille, la couleur ou les contours des textes, ou encore l'opacité des modèles 3D présentés en superposition via la réalité augmentée. Plus généralement l'utilisation de codes couleurs et de

pictogrammes appropriés peu également contribuer à transmettre plus facilement et efficacement certaines informations. Par ailleurs, dans le cadre de leur approche liée au processus cognitif des opérateurs, Wang et al. [57] indiquent que l'apparence des informations revêt un rôle primordial dans la compréhension des tâches et suggèrent que celle-ci doit être soigneusement choisie en fonction de la phase cognitive à laquelle se rapporte l'information en question. Ainsi, dans la phase perceptive, il est préférable de présenter les modèles 3D des éléments importants tandis que dans la phase suivante, la phase d'attention, l'attention de l'opérateur est plutôt dirigée par des flèches 3D pointant vers les points d'intérêt pour les localiser plus facilement sans pour autant induire une occlusion visuelle pouvant entraîner un détournement de l'attention de l'opérateur. En effet, si l'opérateur n'est pas en mesure de voir directement le point d'intérêt (par exemple un outil ou une pièce d'un assemblage) au travers de l'interface de réalité augmentée pour confirmer son identification, alors il peut être amené à détourner son regard du dispositif de réalité augmentée pour observer l'environnement réel sans être dérangé par les indications 3D. Cette transition entre l'environnement réel et l'environnement augmenté peut alors se traduire en une élévation de la charge cognitive. Petersen et Stricker [68] présentent d'autres représentations 3D permettant de localiser un point d'intérêt. Parmi les exemples illustrés, les entonnoirs d'attention permettent notamment d'aider l'opérateur à localiser un point d'intérêt même si celui-ci est en dehors de son champ de vision. Enfin, Li et al. [66] fournissent de nombreux exemples d'apparences différentes destinées à des modes d'informations variés tels que le texte, les images ou encore les augmentations 3D.

Quantité d'information :

Il est tout d'abord possible de faire varier la quantité d'informations présentées lors de la procédure. Une aide approfondie peut par exemple être proposée aux profils moins expérimentés en détaillant les explications d'une tâche difficile à réaliser. À l'inverse, les experts pourront préférer être exposés à une quantité d'informations plus faible permettant de préserver une vision macroscopique de la procédure et ainsi d'éviter de devoir faire le tri entre ce qu'ils savent déjà et ce qu'il est vraiment nécessaire de garder pour pouvoir accomplir la tâche.

Redondance des informations :

La redondance des informations peut également être modulée selon les besoins. Cette redondance peut dépendre de deux facteurs, à savoir, la complexité de la tâche ou de l'action décrite et le niveau d'expertise de l'opérateur. On aura par exemple tendance à n'expliquer qu'une seule fois comment visser une vis d'assemblage correctement alors que l'utilisation d'un équipement plus spécifique pourra être détaillée plusieurs fois lors de la procédure pour que l'opérateur puisse l'apprendre et la retenir plus efficacement. Le niveau d'expertise peut également être considéré dans la mesure où un opérateur, ayant déjà effectué des tâches ou des actions similaires, peut projeter ses connaissances et ses compétences sur la nouvelle tâche à effectuer sans avoir besoin de recourir à davantage d'explications. La répétition faisant partie du processus d'apprentissage [61], il peut donc être intéressant de fournir plusieurs fois le même type d'information afin de s'assurer que l'opérateur a bien assimilée ce qui lui est demandé.

Structure de la procédure de l'opération assistée

La séquence de la procédure est tout aussi importante car elle permet de structurer l'opération et d'organiser la présentation des informations à l'opérateur au cours du temps. Décomposer une procédure en une succession d'étapes, plutôt que de présenter directement l'ensemble de l'opération à réaliser, permet d'éviter de surcharger l'opérateur d'informations qu'il serait alors contraint de trier et d'organiser.

Nombre d'étapes :

Le nombre d'étapes de la procédure décrivant une activité de maintenance n'est pas nécessairement fixé à l'avance. En effet, une tâche peut être décrite dans son ensemble, en une seule étape ou bien comme une succession d'étapes plus élémentaires, chacune détaillant une action précise. Prenons l'exemple d'une tâche simple et souvent rencontrée lors d'opérations d'assemblage : le serrage d'un écrou. Cette tâche peut être décrite en une étape en présentant simultanément toutes les informations nécessaires à sa bonne exécution. Il suffit de présenter l'écrou et l'outil à utiliser, l'emplacement de cet écrou sur l'assemblage en cours et le couple de serrage à appliquer. Dans un deuxième scénario plus détaillé, il est possible de décomposer la tâche en ne traitant qu'une information par étape. Les informations peuvent ainsi être présentées de la façon suivante :

- Etape 1 : Présentation de la référence de l'écrou à serrer
- Etape 2 : Localisation de l'écrou à serrer

- Etape 3 : Dénomination de l’outil à utiliser
- Etape 4 : Localisation de l’outil à utiliser
- Etape 5 : Localisation du point de serrage sur l’assemblage
- Etape 6 : Mouvement à effectuer pour serrer l’écrou
- Etape 7 : Indication du couple de serrage à appliquer

Volume d’information /densité d’informations par étape :

Le nombre d’étapes et le volume d’informations contenues dans chacune d’entre elles devraient être ajustés selon les caractéristiques de l’opérateur. De cette manière, un opérateur expérimenté pourra suivre une procédure dont le nombre d’étapes est volontairement limité pour que la structure du scénario ne pèse pas sur ses performances. Dans ce cas, le volume d’informations peut devenir conséquent et représenter une charge trop importante pour les moins expérimentés. On préférera alors un découpage plus prononcé permettant de distiller l’information dans des proportions acceptables afin de ne pas perdre l’opérateur et de l’accompagner au mieux lors de sa montée en compétences [69].

Ordre des étapes :

L’ordre des étapes peut aussi être modifié pour satisfaire des préférences de l’opérateur. Dans ce cas il faut néanmoins veiller à ce que les contraintes de précédence inhérentes à la procédure soient bien respectées afin que l’opération puisse être réalisée correctement. Chaque agencement des étapes doit pouvoir satisfaire une ou plusieurs contraintes précises comme la réduction des déplacements autour d’un équipement volumineux, le traitement successif d’actions de même nature ou encore la minimisation des changements d’outils.

Fonctionnement du système d’assistance et gestion des préférences de l’utilisateur

En tant que nouvel outil intervenant dans l’exécution des tâches de maintenance, le système d’assistance adaptative doit être pris en compte dans la caractérisation du mode de travail de chaque opérateur. Comme tout outil, celui-ci est en effet susceptible d’être utilisé différemment d’un opérateur à l’autre.

Fréquence d'adaptation :

Le premier paramètre ajustable du système d'assistance est la fréquence d'adaptation des contenus. Il est important de bien régler la fréquence à laquelle le système va venir modifier le contenu. En effet, si le système modifie l'apparence des informations toutes les trente secondes, cela peut représenter une gêne pour l'opérateur qui devra sans cesse s'adapter à traiter un type d'information différente. A l'inverse, si le système est configuré pour n'adapter les contenus qu'une fois par mois, les bénéfices apportés par cette adaptation pourraient être moindres car, dans ce cas, l'opérateur peut être confronté à une assistance pas peu adaptée à ses besoins pendant une longue période avant de se voir proposer une alternative plus adaptée.

Modes d'interaction :

Les modes d'interactions constituent également un élément qu'il est possible d'ajuster selon les préférences de l'opérateur. Les modes d'interaction les plus utilisés restent le touché via un écran tactile ou la gestuelle des mains, souvent utilisée par les systèmes utilisant un visiocasque comme solution matérielle. Le Multiple Ressource Model de Wickens [39], suggère qu'il est plus judicieux, pour des tâches complexes, de coupler des modes d'information et d'interaction de natures différentes afin d'optimiser la gestion des ressources cognitives de l'utilisateur. Ainsi, il peut être intéressant de proposer à l'utilisateur de recourir à la commande vocale pour interagir avec le système d'assistance lorsque celui-ci délivre des informations visuelles.

Gestion des requêtes utilisateur :

La plupart des systèmes d'assistance ne permettent pas à l'opérateur d'ajuster manuellement le contenu qui lui est fourni. Pourtant, il peut être intéressant de laisser une certaine liberté à l'utilisateur pour que celui-ci puisse choisir lui-même s'il veut que le système d'assistance lui présente plus ou moins d'informations [58], tout comme il est possible de laisser le choix entre plusieurs ergonomies afin qu'il choisisse celle qui lui convient le mieux. Il faut cependant veiller à ne pas laisser non plus trop de liberté au risque que l'utilisateur perde du temps à faire des choix.

Retours système :

Les retours systèmes sont importants pour enrichir l'expérience sensorielle de l'opérateur et ainsi renforcer l'impact des informations qui lui sont transmises. Ces retours sont aussi utilisés pour traduire la réussite des interactions de l'opérateur avec le système et maintenir l'engagement de l'opérateur au long de la réalisation de la tâche. Dans le contexte de l'assistance aux opérations de maintenance par réalité augmentée, les retours visuels restent les plus employés. S'ils sont simples à mettre en place, une quantité trop importante de ces retours peut devenir une source de distraction. C'est pourquoi il est souvent intéressant de coupler d'autres types de retours comme les retours sonores ou tactiles [57].

3.2.5. Indicateurs évaluant les caractéristiques de l'opérateur

Evaluation des performances

L'évaluation des performances opérationnelles est une activité revêtant une importance majeure dans le milieu industriel car elle permet de quantifier les coûts des opérations. C'est pour cette raison que les industriels utilisent déjà des indicateurs de performances clés (le plus souvent appelés KPI pour Key Performance Indicator) afin d'évaluer la qualité et le temps de cycle des tâches menées par les opérateurs. Le taux d'erreur est l'indicateur privilégié pour représenter la qualité d'une opération. Le nombre d'erreurs commises pendant la tâche est quantifié puis comparé aux valeurs obtenues pour d'autres ordres de travail. L'autre KPI largement utilisé est le temps d'exécution. Cet indicateur peut être mesuré à l'échelle d'une opération, d'une activité ou d'une tâche. La mesure du temps action par action est beaucoup plus rare car elle nécessite un suivi plus détaillé du processus évalué.

Evaluation de la charge cognitive

Questionnaires :

L'évaluation de la charge cognitive est souvent réalisée par l'intermédiaire de questionnaires dédiés. Le plus utilisé reste le NASA-TLX (NASA Task Load index) développé par Hart et al. [70] dans les années 1980. Son utilisation fréquente dans la littérature durant les dernières

décennies fourni un historique solide permettant d'avoir une confiance relativement bonne dans les résultats obtenus par son intermédiaire [71]. Le NASA-TLX comporte deux parties. La première partie est composée de six questions relatives à la demande mentale, la demande physique, la demande temporelle, la performance (estimé par l'utilisateur), l'effort et la frustration induits par la tâche. Chacune de ces composantes est évaluée sur une échelle de Lickert à 21 niveaux. La deuxième partie consiste en une comparaison par paire de composantes afin de déterminer leur importance relative accordée par l'utilisateur. Ces comparaisons permettent ainsi de pondérer les résultats obtenus pour chacune des six questions de la première partie. Le résultat final de ce questionnaire consiste en un indicateur unique compris entre 0 et 100 et rendant compte de la charge cognitive globale de l'utilisateur. Ainsi un score de 0 représente une charge cognitive nulle tandis qu'un score de 100 représente la charge cognitive maximale. Une autre version de ce questionnaire ne comprenant pas la deuxième partie est également souvent utilisée. Cette version n'utilisant que les scores non pondérés de chacune des six composantes est appelée RTLX (Raw Task Load index). Plusieurs études ont montré que, dans la plupart des cas, le score brut obtenu permet déjà d'obtenir une bonne estimation de la charge cognitive de l'utilisateur [71]. Dans tous les cas, un score élevé traduit une charge cognitive élevée tandis qu'un score faible traduit une charge cognitive faible. Hertzum [72] fourni des valeurs moyennes par champ d'application sur la base de plusieurs centaines d'études. On peut par exemple noter que le score moyen du NASA TLX est de 45 ± 17 pour les applications se rapportant à des processus de contrôle.

Bien que fournissant des résultats pertinents, le NASA-TLX reste un indicateur subjectif de la charge cognitive. De plus, ce type d'évaluation est réalisé de façon ponctuelle et n'offre donc qu'une vision macroscopique de l'évolution de la charge cognitive de l'utilisateur. En effet, ce type d'évaluation est généralement conduit à l'issue d'une tâche et ne permet donc pas d'observer le processus de cognition plus en détails, à l'échelle de chaque action par exemple. Cegarra et Chevalier [73] soulignent ainsi l'intérêt de compléter ce type de mesures subjectives avec des mesures physiologiques et comportementales plus objectives et pouvant être mesurées à une fréquence plus élevée. Les auteurs soulignent, par ailleurs, la puissance du NASA-TLX pour identifier plus précisément la source de la charge cognitive là où les données physiologiques fournissent davantage une tendance globale. Les différents indicateurs physiologiques ont également chacun leurs limites et leurs avantages. C'est pourquoi il est

intéressant de croiser leur analyse afin de gagner en sensibilité dans l'évaluation de la charge cognitive [74].

Suivi du regard :

De nombreuses informations issues du suivi du regard de l'utilisateur permettent de renseigner sur sa charge cognitive. Ahlstrom and Friedman-Berg [75] définissent plusieurs métriques liées à l'activité du regard de l'utilisateur. Ces métriques sont définies à partir des données de fixations et de saccades acquises au moyen d'un système de suivi de mouvements des yeux et de la tête. Une fixation est définie comme un nombre d'échantillons successifs pour lesquels l'écart angulaire inter-échantillon de la direction du regard est inférieur à un certain seuil (1° dans l'étude). Une saccade est ensuite définie comme la transition entre deux fixations. Par exemple, le regard de l'utilisateur fait un aller-retour entre deux points A et B, cela représente deux saccades, la première étant celle représentant le trajet de A vers B et la deuxième, celui de B vers A. Ces deux mesures (fixations et saccades) permettent ensuite de définir d'autres métriques représentatives du comportement du regard de l'utilisateur et pouvant servir à l'évaluation de la charge cognitive. Parmi ces métriques, on retrouve la fréquence de clignement des yeux, la durée de clignement, la fréquence des saccades, la distance des saccades (longueur du trajet entre deux fixations) et le diamètre des pupilles.

Parmi ces métriques, les plus pertinentes s'avèrent être la durée de clignement des yeux et le diamètre moyen des pupilles. Ainsi, d'après les résultats obtenus sur une opération de contrôle d'une centrale nucléaire [76], une diminution de la durée de clignement traduit une augmentation de la charge cognitive. Une augmentation du diamètre moyen des pupilles traduit également une augmentation de la charge cognitive.

Paramètres physiologiques :

Plusieurs paramètres physiologiques sont souvent mesurés pour évaluer la charge cognitive d'un utilisateur. Parmi ces paramètres figurent le rythme cardiaque, la variabilité du rythme cardiaque, la pression sanguine, la fréquence respiratoire, la conductance de la peau ou encore les signaux issus d'électro-encéphalogrammes.

a. Activité cardiaque

Les mesures liées au cycle cardiaque sont les plus utilisées dans la littérature concernant l'évaluation de la charge cognitive [77]. Ces mesures sont plébiscitées car leur mise en place est aujourd'hui grandement facilitée par l'introduction de capteurs accessibles et faciles d'utilisation. Le cycle cardiaque type représenté sur la Figure 22 comporte cinq points caractéristiques P-Q-R-S-T. Les données cardiaques peuvent être analysés dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. Ainsi, les mesures les plus utilisées sont le rythme cardiaque (ou plus précisément la variabilité du rythme cardiaque) correspondant au nombre de cycles cardiaques effectués par minute et l'intervalle entre battements exprimé en millisecondes (ms) correspondant à la durée séparant deux cycles (typiquement la durée entre deux points R successifs, on parle d'ailleurs souvent d'intervalle R-R).

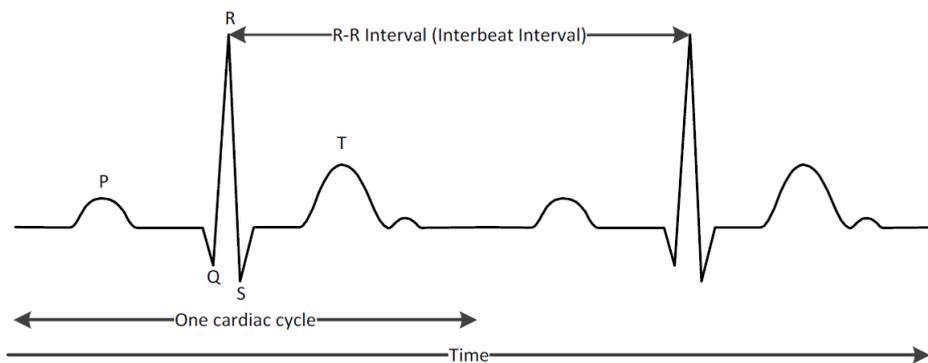


Figure 22 : Cycle cardiaque type [77]

De nombreuses études [78] montrent qu'une augmentation du rythme cardiaque ou une réduction de l'intervalle entre battements traduisent toutes deux une augmentation de la charge cognitive.

Il a également déjà été montré qu'une augmentation de la pression sanguine intervient lorsque la charge cognitive augmente. Cependant nous ne retenons pas cette mesure dans notre modèle car elle reste trop dépendante de l'état physiologique dans lequel se trouve l'utilisateur et sa mesure est difficile à mettre en place en environnement industriel.

b. Activité respiratoire

La mesure de l'activité respiratoire permet également d'évaluer l'évolution de la charge cognitive d'un utilisateur. Les deux indicateurs principalement utilisés dans ce domaine sont la fréquence respiratoire et le volume respiratoire. Tout comme la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire est facilement mesurable. Les études utilisant ce genre de mesures [77] montrent qu'une élévation de la fréquence respiratoire traduit une augmentation de la charge cognitive. Une augmentation de cette charge aura également pour effet de diminuer le volume respiratoire.

c. Activité électrodermale

L'activité électrodermale est due à des changements d'activité électrique survenant dans les glandes sudoripares. Les indicateurs associés à cette activité sont le niveau de conductance de la peau (SCL pour Skin Conductance Level) et la réponse de conductance cutanée (SCR pour Skin Conductance Response). Toutefois, si certaines études ont déjà montré des résultats intéressants concernant la corrélation ces données issues de l'activité électrodermale et la charge cognitive de l'utilisateur, cette activité reste dépendante de nombreux paramètres démographiques et environnementaux telles que l'âge, le genre, la température, le moment de la journée ou encore les saisons. Bien que les mesures traduisant l'activité électrodermale soient aujourd'hui relativement simples à mettre en place, leur trop grande sensibilité aux paramètres environnementaux nous incite à écarter ce genre de mesures pour une évaluation de la charge cognitive en conditions opérationnelles.

d. Activité cérébrale

Tout comme l'activité cardiaque, l'activité cérébrale peut être étudiée dans les domaines temporels et fréquentiels pour obtenir des informations sur la charge cognitive de l'utilisateur. Les deux principaux outils utilisés dans l'analyse de l'activité cérébrale sont l'étude des potentiels liés aux événements (ERP pour Event Related Potential) et l'analyse fréquentielle d'électroencéphalogrammes (EEG). Les mesures d'ERP représentent des changements de potentiels électriques en réponse à un événement. La dénomination utilisée pour ces signaux caractéristiques se base sur la polarité du signal et le temps de réponse après l'événement considéré. Les signaux de polarité positive sont désignés par la lettre P tandis que les ceux de polarité négative sont désignés par la lettre N. Ainsi la composante N200 (parfois abrégée en

N2 comme noté sur la Figure 23) correspond à la réponse de polarité négative et survenant 200ms après l'événement considéré. Parmi les différentes composantes du signal ERP, la plus utilisée reste la P300. Plusieurs études rapportent une bonne corrélation entre une diminution de l'amplitude de la P300 et une augmentation de la charge cognitive.

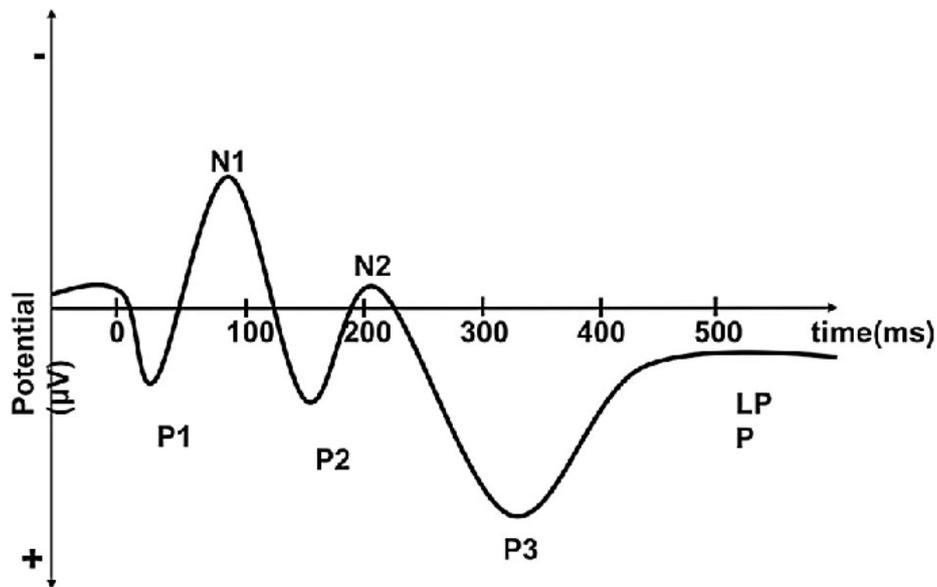


Figure 23 : Exemple de signal ERP [79]

L'analyse fréquentielle de l'EEG s'appuie sur un découpage des fréquences en bandes caractéristiques. Ces bandes sont énumérées dans le Tableau 3.

Bande caractéristique	Plage de fréquences
Delta	1-2 Hz
Theta	4-7 Hz
Alpha	8-13 Hz
Beta	14-25 Hz

Tableau 3 : Bandes analyse fréquentielles de l'EEG

De nombreuses études [74, 80, 81] rapportent une corrélation entre les changements de charge cognitive et les changements de puissance observés pour les différentes bandes de fréquences. Ainsi la puissance de la bande alpha diminue lorsque la demande cognitive exigée par la tâche

augmente. Une augmentation de cette demande aura aussi pour effet d'augmenter l'activité (c'est-à-dire la puissance) dans la bande θ .

Ainsi, l'évolution des signaux issus de l'EEG montrent une bonne sensibilité aux variations de la charge cognitive. Toutefois ce genre de mesures reste contraignant à mettre en place car celles-ci nécessitent une instrumentation de l'utilisateur. L'analyse fréquentielle des données nécessaire pour extraire des résultats exploitables reste complexe et peut donc aussi représenter un frein quant à l'utilisation de cette méthode d'évaluation de la charge cognitive.

Récapitulatif des indicateurs d'évaluation de la charge cognitive

Les indicateurs permettant d'évaluer la charge cognitive ou ses variations sont nombreux. Les questionnaires constituent un moyen simple de quantifier la charge cognitive d'un utilisateur de façon ponctuelle. Cependant ce moyen de mesure repose sur une estimation subjective faite par l'utilisateur lui-même. Il est donc intéressant de coupler ce type de mesure avec des indicateurs objectifs et, qui plus est, capables de fournir une évaluation beaucoup plus fine dans le temps de la charge cognitive et de ses variations. Les indicateurs liés à différentes activités physiologiques de l'utilisateur renseignent sur l'évolution de la charge cognitive lorsque l'utilisateur effectue une activité. Le Tableau 4 met en correspondance l'évolution de chacun des indicateurs abordés avec l'évolution de la charge cognitive. Certains indicateurs comme les puissances α et β issues de l'EEG sont même sensibles aux stimulus externes. Les indicateurs liés à l'activité respiratoire peuvent être compliqués à mettre en place si la tâche effectuée par l'utilisateur sollicite celui-ci de façon importante sur le plan physique tandis que les indicateurs liés à l'activité électrodermale peuvent être affectés par de nombreux paramètres environnementaux. Enfin, l'activité cardiaque reste la plus simple à mesurer et les indicateurs s'y rapportant sont assez robustes pour établir facilement une correspondance avec la charge cognitive pour une grande variété de tâches.

	Indicateur	Evolution de l'indicateur correspondante à une augmentation de la Charge Cognitive (CG)	Fiabilité de l'estimation de la charge cognitive
Suivi du regard	Diamètre des pupilles (D_p)	$D_p \nearrow \equiv CWL \nearrow$	2
	Durée de clignement (d_b)	$d_b \searrow \equiv CWL \nearrow$	2
Activité cardiaque	HRV	$HRV \nearrow \equiv CWL \nearrow$	2
	IBI	$IBI \searrow \equiv CWL \nearrow$	1
Activité respiratoire	Fréquence respiratoire (f_r)	$f_r \nearrow \equiv CWL \nearrow$	1
	Volume respiratoire (V_r)	$V_r \searrow \equiv CWL \nearrow$	1
Activité cérébrale	Amplitude P300	$P300 \searrow \equiv CWL \nearrow$	2
	Puissance α (P_α)	$P_\alpha \searrow \equiv CWL \nearrow$	2
	Puissance β (P_β)	$P_\beta \nearrow \equiv CWL \nearrow$	1

Tableau 4 : Correspondance entre l'évolution des indicateurs physiologiques et l'évolution de la charge cognitive

Evaluation des préférences

L'historique d'activité constitue un premier moyen d'évaluation des préférences de l'utilisateur. Cet historique consiste en un enregistrement des interactions de ce dernier avec le système. Il peut s'agir de la navigation dans le scénario d'assistance. Plusieurs aller retours entre différentes étapes peuvent, par exemple, traduire un découpage inadapté de la séquence pour l'opérateur. Dans le cas où le système intègre une gestion de requêtes de l'utilisateur, il est possible de mémoriser ces dernières afin de tenir compte de la façon dont l'utilisateur interagit avec le système pour configurer celui-ci de façon personnalisée lors des sessions ultérieures. Ces requêtes peuvent concerner le mode de visualisation des informations. Un opérateur peut par exemple lancer une vidéo illustrant les gestes à effectuer pour réaliser la tâche en complément des informations textuelles ou 3D déjà affichées. Le système peut ensuite privilégier ce mode de représentation pour les sessions suivantes. Différentes interfaces utilisateur peuvent aussi être proposées et enregistrées pour une expérience utilisateur personnalisée.

Synthèse des indicateurs d'évaluation des caractéristiques de l'opérateur

Comme nous venons de le voir au travers des paragraphes précédents, les indicateurs permettant d'évaluer les caractéristiques de l'opérateur sont nombreux. Si les performances sont assez simples à mesurer, ce n'est pas forcément le cas des préférences et de la charge cognitive. Le suivi des préférences se fait principalement par le biais d'un suivi d'activité enregistrant les interactions avec le système d'assistance et renseignant ainsi sur la façon de travailler de l'opérateur. La représentation de ces différentes stratégies de travail sera d'autant plus détaillée si le système laisse une certaine liberté à l'opérateur dans sa façon d'exécuter les tâches. Concernant l'évaluation de la charge cognitive, celle-ci peut être réalisée par des indicateurs subjectifs ou objectifs. Les indicateurs subjectifs prennent la forme de questionnaires, dont certains sont standardisés et largement utilisés, bénéficiant ainsi d'un historique solide permettant d'estimer leur validité. Le plus représenté dans le domaine reste le NASA-TLX qui offre un outil simple à mettre en place, à utiliser et rapide. Il reste toutefois intéressant de croiser, si possible, les données obtenues à l'aide de ce genre de questionnaires avec des indicateurs objectifs. Ces indicateurs se basent principalement sur le comportement (mouvement des mains, de la tête, déplacement dans l'environnement, etc.) ou sur la physiologie (Activité cardiaque, respiratoire, visuelle ou électrodermale) de l'opérateur. La Figure 24 récapitule et offre une cartographie de l'ensemble des différents indicateurs pouvant servir à l'évaluation de chacune des caractéristiques de l'opérateur.

Enfin, rappelons que l'objectif de cette section 3.2.5 est de fournir un inventaire large de tous les indicateurs pouvant servir à l'évaluation des performances, des préférences ou de la charge cognitive de l'opérateur. Les indicateurs retenus sont ceux qui présentent un intérêt et dont la mise en place est réalisable dans le contexte de la maintenance industrielle.

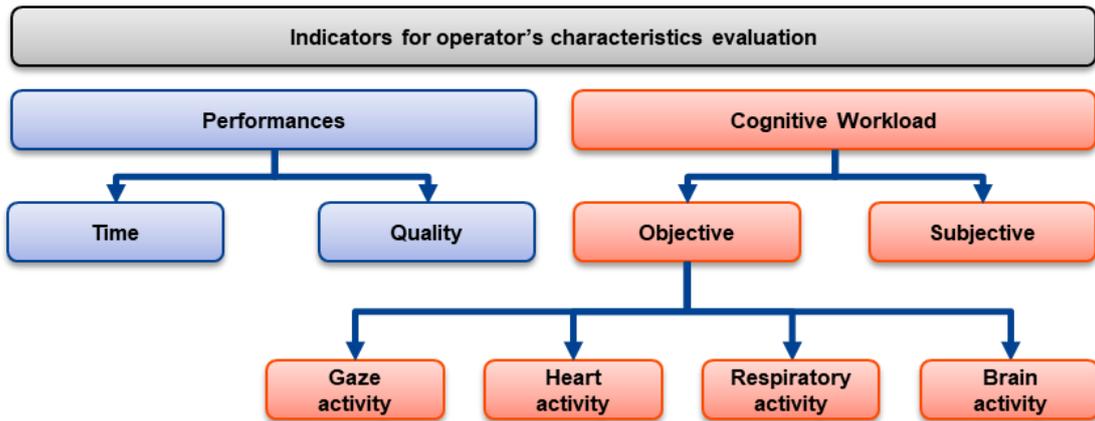


Figure 24 : Inventaire des indicateurs permettant d'évaluer des caractéristiques de l'opérateur

3.3. Conception du ARAAS

3.3.1. Description de l'opération de maintenance cible

La première étape de la conception d'un ARAAS consiste en une description de l'opération de maintenance cible et de l'environnement dans lequel celle-ci intervient. En se basant sur la décomposition des opérations de maintenance présentée dans la section 3.2.1, il est tout d'abord nécessaire d'identifier les tâches et les actions composant l'opération en question. En effet, chaque type de tâche requiert différents types d'informations pour être assimilée et exécutée correctement par l'opérateur. Les caractéristiques identifiées dans la section 3.2.2 doivent également être prises en compte pour déterminer les éléments ajustables en contexte opérationnel (voir section suivante).

A ces caractéristiques viennent s'ajouter celles présentée dans le Tableau 5 qui servent à évaluer la faisabilité de la mise en œuvre des indicateurs devant servir à mesurer la charge cognitive. La demande physique représente l'effort physique à fournir pour accomplir la tâche. Cet effort est induit par des actions comme la manipulation, le déplacement ou encore la levée de certains éléments lourds. La communication orale concerne les tâches nécessitant l'usage de la voix pour transmettre des informations. La durée de la tâche est le temps total moyen nécessaire à l'exécution de l'opération de maintenance. Pour finir, les considérations éthiques représentent la dureté de la politique de l'entreprise concernant l'acquisition et le traitement de données personnelles liées aux opérateurs.

Caractéristiques	Niveaux / paramètres influents
Demande physique	Fréquence de manipulation des pièces Dimensions du produit Poids du produit
Communication orale	Complexité des communications (mot / phrases ?) Fréquence de communication
Mobilité	0 – pas de mouvement significatif requis 1 – navigation limitée 2 – navigation autour de l'équipement 3 – navigation entre plusieurs stations de travail 4 – navigation dans l'atelier
Durée de l'opération	0 – quelques secondes 1 – quelques minutes 2 – quelques dizaines de minutes 3 – quelques heures

	4 – plus d’un shift (environ 8h)
Considérations éthiques	0 – pas de considération éthique spécifique 2 – autorisation de l’opérateur requise une fois 4 – autorisation de l’opérateur systématiquement requise

Tableau 5 : Guide pour l'évaluation des niveaux des caractéristiques impactant le choix des indicateurs

3.3.2. Sélection des éléments ajustables

Restrictions d'utilisation

Outre les contraintes limitant la possibilité d'ajuster certains éléments, certaines études ont déjà montré des résultats intéressants quant à l'utilisation de tel ou tel autre élément pour des cas d'usages précis. Polvi et al. [82] ont par exemple montré que l'utilisation d'annotations 3D en réalité augmentée pour l'assistance à l'inspection donnent de meilleurs résultats pour des tâches où une grande mobilité est requise comparé à des instructions visuelles sous forme d'image 2D. Les travaux de Ariansyah et al. [38] montrent que pour des tâches peu complexes, le mode d'interaction avec le système, en l'occurrence la gestuelle ou la commande vocale, n'a pas d'influence significative sur les performances observées des utilisateurs. Il est donc important de bien évaluer la complexité de l'opération de maintenance traitée.

La sélection des éléments ajustables pertinents dans le contexte de l'opération de maintenance cible se base sur la description de cette opération mettant en valeur les relations de contraintes pouvant exister entre les caractéristiques de l'opération de maintenance et les éléments ajustables envisagés (voir Tableau 6). Le nombre de tâches composant l'opération, le nombre de pièces constituant le produit impliqué dans l'opération et le nombre de zones d'intérêt vont directement impacter la quantité d'information que le système doit fournir aux opérateurs pour pouvoir accomplir l'opération. De plus, une quantité importante d'informations peut nécessiter de découper le flux d'information diffusé à l'opérateur en une séquence dont la densité d'information par étape ne dépasse pas un certain niveau afin de ne pas surcharger l'opérateur. De cette manière, les trois caractéristiques citées plus haut ont un impact sur la quantité d'informations, le nombre d'étapes ainsi que la densité d'informations. Le nombre d'outils utilisés au cours de l'opération peut exercer une influence sur l'ordre des étapes si le système permet de prendre en compte les préférences de l'opérateur concernant l'ordre dans lequel il souhaite réaliser les différentes tâches composant l'opération. En effet, si plusieurs outils sont

utilisés de façon répétée sur plusieurs tâches, l'opérateur devrait pouvoir décider de l'ordre de leur exécution s'il veut minimiser les changements d'outils. Le nombre d'outil peut également exercer une influence sur la redondance des informations présentées. En particulier si les outils en question sont très spécifiques, leur utilisation peut requérir une phase d'apprentissage plus conséquente. Le nombre de pièces à manipuler et le nombre de mains utilisées auront, quant à eux, une incidence sur le choix des modes d'interactions mis à disposition des opérateurs. En effet, si une opération nécessite une manipulation fréquente à deux mains, il sera difficilement envisageable de contraindre l'opérateur à interagir avec le système de réalité augmentée par la gestuelle ou d'autres périphériques nécessitant une utilisation manuelle tels qu'un écran tactile ou un clavier. Dans ce cas il peut alors être judicieux de restreindre les modes d'interactions disponibles à la commande vocale. Les dimensions du produit peuvent avoir un impact sur l'apparence à favoriser pour les informations. En effet, un produit de grandes dimensions peut contraindre l'opérateur à se situer dans différentes positions relatives à ce produit. Ainsi, l'emphase mise sur une petite pièce composant un assemblage de grandes dimensions sera moins forte lorsque l'opérateur est près de l'assemblage en question alors que cette mise en évidence sera plus forte lorsque l'opérateur est distant. De la même façon, certaines représentations, comme les entonnoirs d'attention [68], peuvent s'avérer mieux adaptées lorsque le point d'intérêt à localiser se trouve en dehors du champ de vision de l'opérateur.

Caractéristiques	Éléments ajustables impactés
Nombre de tâches Nombre de pièces à identifier Nombre de zones d'intérêt	Nombre d'étapes Quantité d'informations Densité d'informations
Nature des tâches	Modes d'informations Apparence des informations Redondance des informations
Nombre d'outils	Redondance des informations Ordre des étapes
Nombre de pièces à manipuler	Modes d'interaction
Dimensions du produit	Apparence des informations
Utilisation des mains	Modes d'interaction

Tableau 6 : Eléments ajustables impactés par les caractéristiques de l'opération

Pour finir, cette sélection des éléments ajustables disponibles pour l'opération ciblée est également dépendante de la nature des tâches composant cette opération. Prenons l'exemple de la tâche « identifier ». Cette tâche implique que l'opérateur reconnaisse un élément de son environnement (une pièce, un outil ou zone d'intérêt) sur la base de son apparence. Ainsi,

l'apparence de l'information présentée en réalité augmentée devrait éviter toute occlusion visuelle avec l'élément en question. Dans le cas contraire, l'opérateur pourrait être contraint de détourner son attention du dispositif de réalité augmentée pour observer directement l'environnement réel, ce qui pourrait alors induire une augmentation de la charge cognitive.

3.3.3. Sélection des indicateurs disponibles

Contraintes relatives à l'instrumentation

Contrairement à un environnement de recherche, l'environnement industriel ne permet pas d'intégrer facilement autant de capteurs que ce qu'il pourrait être souhaitable d'avoir afin d'évaluer, le plus finement et le plus régulièrement, les caractéristiques de l'opérateur. En effet le choix des capteurs dans ce genre d'environnement est confronté à des contraintes de coûts, d'ergonomie au poste, d'acceptabilité de la part des opérateurs ou encore de dangers pouvant être dû à l'interaction de ces capteurs avec des outils ou équipements déjà présents en atelier.

Les indicateurs disponibles dépendent donc avant tout des capteurs embarqués dans la solution matérielle choisi pour le système d'assistance adaptative en réalité augmentée. Le choix de ce matériel est conditionné par des contraintes imposées par l'environnement de travail ou bien directement par la tâche en elle-même. Ainsi une tâche d'inspection visuelle ne nécessite pas une utilisation intensive des mains alors que les activités de montage et de démontage impliquent une très fréquente des deux mains. Cependant les capteurs embarqués peuvent aussi être complétés d'autres capteurs externes à la solution matérielle choisie. Cependant l'ajout de capteurs sans diminution de la mobilité reste un défi. Le potentiel d'évolution de chaque type de dispositif va donc dépendre de la mobilité offerte par ces-derniers. De façon plus générale, les moyens de mesure doivent rester le plus discret possible et leur utilisation doit être aussi transparente que possible afin de ne pas impacter les performances sur la tâche assistée.

Contraintes liées aux caractéristiques de la tâche

Les données associées à l'activité respiratoire peuvent être fortement altérées lorsque la tâche considérée implique une activité physique importante. De plus, les tâches impliquant une communication verbale fréquente peuvent perturber la respiration de l'opérateur [77].

Le choix des indicateurs doit aussi prendre en compte la durée de la tâche assistée. En effet, certains indicateurs permettant d'évaluer la charge cognitive de l'opérateur peuvent perdre en sensibilité lorsque la tâche vient à durer. C'est notamment le cas de la fréquence respiratoire et de la fréquence de clignement des yeux [77]. Les mesures relatives à l'activité électrodermale deviennent également moins pertinentes lorsque la tâche dure trop longtemps [77]. Par ailleurs, Les données issues de l'activité respiratoire ne sont pas adaptées aux activités nécessitant un effort physique important de la part de l'utilisateur [83].

Synthèse

Toutes ces contraintes peuvent être synthétisées dans une matrice représentant leur impact sur la faisabilité de la mise en place du suivi de chacune des activités physiologiques pouvant servir à l'évaluation de la charge cognitive. Ainsi, en nous appuyant sur les considérations techniques liés au matériel de mesure ainsi que sur les travaux de Charles et al. [77] nous avons évalué l'impact de chacune des caractéristiques en leur attribuant un niveau d'importance entre 0 et 2 se traduisant de la façon suivante : 0. Impact faible, 1. Impact modéré, 2. Impact fort.

Les coefficients de la matrice ainsi obtenue (représenté par le Tableau 7) sont appelés facteurs d'impact. Le facteur d'impact de la caractéristique i sur le suivi de l'activité physiologique φ est noté $IF_{i/\varphi}$. Nous rappelons que ces caractéristiques i sont celles définies dans la section 3.3.1.

	Demande physique	Communication verbale	Mobilité	Durée de l'opération	Considérations éthiques
Activité du regard	0	0	0	2	1
Activité cardiaque	1	1	0	1	1
Activité respiratoire	2	2	2	2	2
Activité cérébrale	0	1	1	0	2

Tableau 7 : Facteurs d'impact des caractéristiques de l'environnement de maintenance sur la faisabilité de la mise en œuvre du suivi des activités physiologiques servant à évaluer la charge cognitive

Dans notre modèle, nous considérons l'évaluation du niveau de chacune des caractéristiques se fait sur une échelle de Likert à 5 niveaux (de 0 à 4) en suivant les indications du Tableau 5. Les

coefficients représentant ces niveaux sont notés α_i pour chaque caractéristique i . Ces n coefficients couplés aux facteurs d'impact présentés dans le Tableau 7 permettent de calculer le niveau d'impact total $I_{T/\varphi}$ pour chaque activité physiologique en suivant la formule (1) ci-dessous :

$$I_{T/\varphi} = \sum_{i=1}^n IF_{T/\varphi} * \alpha_i \quad (1)$$

Ce niveau d'impact total est ensuite normalisé en appliquant la formule (2) pour obtenir le score d'impact S_φ pour chacune des activités physiologiques.

$$S_\varphi = 1 - \frac{n}{I_{T/\varphi}} \quad (2)$$

Ainsi, plus ce score est bas, plus facile sera la mise en œuvre du suivi de l'activité physiologique φ correspondante.

3.3.4. Conception d'une stratégie d'adaptation

Après avoir identifié les indicateurs permettant la caractérisation de l'opérateur et les éléments ajustables pertinents en regard des contraintes de l'opération de maintenance et de l'environnement de travail, il convient de se pencher sur les relations entre ces deux éléments afin de pouvoir définir le comportement du système d'assistance adaptative en réponse au contexte d'utilisation. Tout d'abord, la stratégie d'adaptation peut prendre en compte plus ou moins de caractéristiques de l'opérateur en entrée. En effet, selon les besoins industriels liés à l'activité de maintenance assistée par le système, il peut par exemple être préférable de favoriser la prise en compte et l'amélioration des performances opérationnelles devant l'intégration des préférences de l'opérateur. Dans ce cas de figure, si la charge cognitive n'est pas ou peu prise en compte pour réguler l'assistance, celle-ci ne peut toutefois pas être entièrement mise de côté dans la mesure où une augmentation de la charge cognitive peut entraîner une dégradation des performances, ce qui va à l'encontre du souhait initial des industriels. La stratégie d'adaptation du système d'assistance adaptative regroupe l'ensemble des relations et des règles conduisant à l'obtention d'une procédure adaptée aux caractéristiques de l'opérateur. L'association d'un niveau d'expertise à un niveau d'assistance reste la stratégie la plus simple et la plus utilisée lorsqu'il s'agit d'adapter des contenus d'assistance aux opérations en fonction de l'opérateur.

La stratégie d'adaptation peut considérer les trois caractéristiques de l'opérateur (performances, préférences et charge cognitive) à des niveaux différents. Si l'idéal serait de concilier ces trois caractéristiques pour adapter l'assistance au plus près des besoins de l'opérateur, la plupart des études [57, 55, 58] proposent des systèmes s'appuyant sur une partie de ces caractéristiques pour prendre leurs décisions.

Ainsi [57] proposent une stratégie d'adaptation s'appuyant sur une compréhension assez fine du processus cognitif de l'utilisateur lors de l'exécution d'une tâche d'assemblage. Ce processus est modélisé par l'enchaînement de différentes phases cognitives. Les quatre types de phases recensées dans ce modèle sont, dans l'ordre, les phases de perception, d'attention, de mémoire et d'exécution. Dans un premier temps, le système détecte la phase cognitive dans laquelle se trouve l'opérateur. L'assistance est alors adaptée de façon spécifique pour chacune de ces phases.

Le système d'assistance adaptative proposé par Geng et al. [55] se base sur les performances, les préférences, l'action en cours et l'état de cette action pour décider de l'indication à fournir à l'opérateur pour l'assister au mieux. Un niveau d'expertise est calculé pour l'opérateur utilisant le système, puis un mode de visualisation des informations est associé en fonction de ce niveau d'expertise. Ainsi, trois niveaux d'expertise sont définis (débutant, intermédiaire et expert). Chacun des différents modes d'informations (photo, vidéo, texte, modèle 3D statique, modèle 3D dynamique, etc.) disponibles sont associés à un de ces trois niveaux. Cette stratégie consistant à établir une correspondance préalable entre un mode d'information et un niveau d'expertise est aussi bien utilisé dans certains systèmes d'assistance adaptative que dans les études faisant intervenir plusieurs groupes d'utilisateur répartis par niveau d'expertise.

Le système ARMS proposé par Siew et al. [58], utilise une stratégie d'adaptation se basant sur les données de suivi du regard de l'utilisateur afin de déterminer le niveau d'assistance à fournir. Si le regard de l'utilisateur réside trop longtemps dans une zone d'intérêt prédéfinie le système lui suggère alors une assistance supplémentaire. L'utilisateur est libre d'accepter cette recommandation tout comme il est libre, à tout moment, de changer de niveau d'assistance par lui-même.

En complément de ces exemples de stratégie d'adaptation issues de la littérature, nous présentons dans la partie suivante, dédiée aux expérimentations, plusieurs stratégies

d'adaptation se basant sur les performances et les préférences de l'utilisateur. Le diagramme Figure 25 représente par exemple les relations entre les caractéristiques des opérateurs et les éléments ajustés par une des applications développées lors des expérimentations et présentée en section 4.3 de la quatrième partie du présent manuscrit.

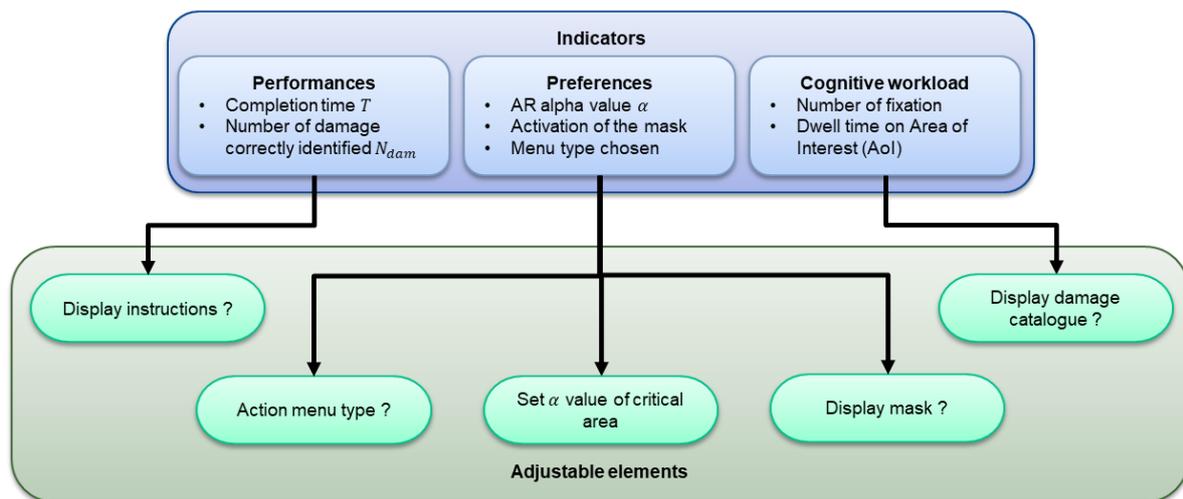


Figure 25 : Exemple de relations existantes au sein d'une stratégie d'adaptation

3.4. Exécution du ARAAS

Pour mettre en application le principe d'adaptation au cœur de la méthodologie proposée, le ARAAS s'appuie sur les trois types de composants évoqués précédemment : les éléments ajustables, les indicateurs utilisés pour évaluer les caractéristiques des opérateurs et enfin, la stratégie d'adaptation. Les éléments ajustables par le système sont tous les paramètres de la procédure que le système est capable de modifier librement sans altérer le bon déroulé de l'opération de maintenance menée par l'opérateur. Ces modifications peuvent s'opérer lors de l'exécution de l'opération ou entre deux sessions de travail afin rendre ce processus le plus transparent possible pour l'opérateur. Les indicateurs utilisés pour l'évaluation des caractéristiques des opérateurs permettent de déterminer ses besoins en termes d'assistance afin de mener l'opération dans les meilleures conditions et avec des performances optimales. Enfin, la stratégie d'adaptation fait le lien entre ces besoins et les éléments que le système va ajuster pour les satisfaire.

3.5. Synthèse de la proposition

La méthodologie proposée fournit un modèle et des lignes directrices visant à faciliter à la fois la conception, la mise en place ainsi que l'évaluation de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée destinés à l'assistance aux opérations de maintenance industrielle. Les recommandations fournies par cette méthodologie s'adressent aussi bien aux applications expérimentales cherchant à explorer les possibilités offertes par l'utilisation de tels systèmes, qu'aux applications industrielles dont la mise en place et l'utilisation nécessitent de considérer des contraintes supplémentaires spécifiques au cas d'usage visé et à l'environnement opérationnel. Les expérimentations présentées dans la quatrième partie de ce manuscrit ont été construites sur la base de cette méthodologie.

Cette méthodologie s'appuie à la fois sur les conclusions présentées dans les nombreuses études de la littérature traitant de tout ou partie de la conception et la mise en œuvre de systèmes d'assistance adaptative et sur les besoins et contraintes observés en environnement industriel chez le groupe SAFRAN, partenaire de ce projet de recherche.

Le concept d'assistance adaptative régissant le fonctionnement du type de système décrit dans cette méthodologie est simple : le système d'assistance adaptative doit être capable de délivrer une information adaptée aux caractéristiques de l'opérateur. Ces caractéristiques, au nombre de trois, sont les suivantes : les performances, les préférences et la charge cognitive. Ainsi l'adaptation de l'assistance proposée dans le cadre de cette méthodologie se veut réactive. Le système évalue donc ces trois caractéristiques afin de modifier la forme ou la façon dont il transmet les informations à l'opérateur afin que celui-ci puisse se concentrer au maximum sur la tâche en cours de réalisation. Les performances caractérisent la vitesse d'exécution et la qualité du travail de l'opérateur. Les préférences caractérisent les spécificités de la méthode de travail de chaque opérateur. Enfin, la charge cognitive traduit le niveau d'utilisation des ressources cognitive de l'opérateur durant la tâche.

Trois composants clés permettent de mettre en œuvre ce concept d'assistance adaptative. Le premier composant est l'ensemble des éléments ajustables par le système pour adapter la forme et la transmission de l'information à l'opérateur. Il s'agit soit de caractéristiques liées aux informations transmises (leur nombre, leur forme, leur redondance), de caractéristiques liées à la séquence d'instructions fournies à l'opérateur (nombre d'étapes, ordre des étapes, densité

d'informations par étape) ou encore de paramètres intervenant directement dans le réglage du système d'assistance adaptative (fréquence d'adaptation, modes de retours systèmes, modes d'interaction avec le système). Le deuxième composant nécessaire à la mise en place d'un système d'assistance adaptative est le panel d'indicateurs utilisés pour évaluer les caractéristiques de l'opérateur. Chacune des caractéristiques de l'opérateur peut être évaluée par différents indicateurs, que ce soient les performances (temps d'exécution, taux d'erreur), les préférences (navigation dans la procédure, suivi d'activité dans le système, recours à des requêtes) ou la charge cognitive (questionnaires, clignement des yeux, diamètre des pupilles, variabilité du rythme cardiaque, fréquence respiratoire, volume respiratoire, amplitude P300, etc.). En outre, il est préférable de recourir à plusieurs indicateurs pour chaque caractéristique afin d'avoir une estimation plus fiable et précise pour chacune d'entre elles, en particulier pour la charge cognitive. Enfin, le troisième composant au cœur du concept d'assistance adaptative est la stratégie d'adaptation. Cette stratégie fait le lien entre les éléments des deux composants précédents (c.-à-d. les éléments ajustables et les indicateurs évaluant les caractéristiques du scénario) en établissant des critères et des relations décidant de quel élément ajuster, dans quelle mesure et dans quelle circonstance en se basant sur les données fournies par les indicateurs utilisés pour évaluer les caractéristiques de l'opérateur en train de réaliser une tâche.

La démarche proposée dans le cadre de cette méthodologie se décompose en trois couches détaillant la modélisation, la conception et l'exécution d'un système d'assistance adaptative en réalité augmentée. La Figure 19 présentée en début de cette section 3 synthétise l'approche globale de la méthodologie présentée et met en avant cette décomposition en trois couches.

La partie modélisation regroupe la modélisation de l'environnement et des opérations de maintenance ainsi que l'inventaire des éléments intervenant dans les processus d'adaptation et l'inventaire des indicateurs permettant d'évaluer les caractéristiques de l'opérateur. La partie conception s'intéresse à l'analyse des caractéristiques de l'opération et de l'environnement de maintenance cibles et de l'influence de celles-ci concernant la sélection des éléments ajustables pertinents et des indicateurs disponibles pour l'évaluation des caractéristiques de l'opérateur. Le choix d'une stratégie d'adaptation compatible avec les objectifs attendus de l'utilisation d'un système d'assistance adaptative sur le cas d'usage cible est également traité dans cette partie conception. Enfin, la troisième et dernière partie traite de l'exécution du système d'assistance

adaptative et notamment de l'évaluation de son impact sur la tâche et l'utilisateur. Cette évaluation peut concerner les performances ou la charge cognitive de l'opérateur, l'objectif de l'utilisation de ce type de système d'assistance visant à améliorer les performances (réduction du temps d'exécution et/ou réduction des erreurs). D'autres aspects peuvent également être étudiés comme l'engagement de l'opérateur envers la tâche et/ou le système d'assistance ou encore la facilité d'utilisation du système d'assistance.

Quatrième partie
Expérimentations et résultats

4. Expérimentations et résultats

4.1. Introduction

4.1.1. Objectifs

Les principaux objectifs de l'approche expérimentale présentée dans cette partie sont au nombre de trois. Le premier objectif est de présenter les résultats obtenus lors des expérimentations menées dans le but d'apporter des éléments de réponse aux questions de recherche identifiées dans la section 2.2. Le deuxième objectif de cette partie est d'appliquer la méthodologie proposée à une opération de maintenance aéronautique. Ce cas d'application permet d'illustrer en détail le déroulé des étapes faisant partie du deuxième étage de la méthodologie. Ces mêmes étapes sont également illustrées dans les différents dispositifs expérimentaux présentés dans les autres sections de cette partie. Enfin cette partie traite des résultats obtenus en appliquant la méthodologie en milieu industriel afin de valider cette dernière.

4.1.2. Rappel des questions de recherche

Les travaux présentés dans cette partie fournissent des éléments de réponses aux différentes questions de recherche établies dans la section 2.2 la deuxième partie. Pour rappel, les questions de recherche en question sont les suivantes :

Q1 : L'adaptation des contenus a-t-elle un impact sur la charge cognitive et sur les performances de l'opérateur comparée à une assistance en réalité augmentée non-adaptative ?

Q2 : L'impact du système d'assistance adaptative sur les performances et la charge cognitive de l'opérateur diffère-t-il selon la stratégie mise en place pour adapter les contenus ?

Q3 : La prise en compte des préférences des opérateurs permet-elle de diminuer leur charge cognitive sans nécessairement dégrader leurs performances ?

Q4 : Comment définir et mettre en œuvre une procédure d'assistance en réalité augmentée adaptée aux caractéristiques de l'opérateur ?

Q4.1 Quelles sont les caractéristiques de l'opérateur à prendre en compte pour adapter l'assistance à ses besoins ?

Q4.2 Quels critères et caractéristiques de l'environnement de maintenance doivent être considérés lors de la conception d'un système de réalité augmentée capable de délivrer une assistance adaptée aux caractéristiques de l'opérateur ?

4.1.3. Approche expérimentale

Afin de répondre à ces questions de recherche, nous avons mis en œuvre différents dispositifs expérimentaux. Tous ces dispositifs traitent de problématiques rencontrées dans le cadre de la maintenance industrielle des trains d'atterrissage. Certaines des expérimentations présentées se déroulent dans un environnement scientifique tandis que d'autres dispositifs ont été développés et testés en environnement de maintenance industrielle (atelier MRO).

Les solutions matérielles utilisées pour mettre en œuvre l'assistance en réalité augmentée sont multiples. Qu'il s'agisse de tablettes ou de visiocasque de type see-through, le choix de ces solutions repose sur des considérations techniques et pratiques. Les visiocasques, du fait de la présence de nombreux capteurs en leur sein (gyroscope, accéléromètre ou encore eye-tracker) permettent de suivre et d'évaluer facilement le comportement de l'utilisateur. Toutefois ce genre de matériel n'est pas encore suffisamment adapté aux contraintes industrielles pour être utilisé en conditions réelles. C'est pourquoi le cas d'étude industriel recourt à une tablette tandis que les autres expérimentations, ayant été réalisées en environnement contrôlé, utilisent un visiocasque. Cette variété de dispositifs permet par ailleurs d'illustrer la flexibilité de la méthodologie présentée précédemment et mise en œuvre dans cette partie.

Les cas d'usage utilisés pour ces expérimentations se rapportent tous à l'inspection. Comme nous l'avons vu lors de la première partie de ce manuscrit, ce type d'opération n'est pas le plus représenté dans les différentes études composant la littérature sur l'assistance en réalité augmentée des opérations industrielles. De plus, la société Safran Landing Systems, déjà engagée dans le développement des usages liés à la réalité augmentée pour le support de ses activités, cherche aujourd'hui à adresser une réponse à ses problématiques liées à l'inspection.

Ainsi, les résultats présentés dans la suite de cette partie sont issus d'expérimentations traitant des problématiques rencontrées pour ce type d'opérations de maintenance. La section 4.2

présente un cas d'application en milieu industriel. Il s'agit de l'inspection visuelle détaillée d'une pièce de structure d'un train d'atterrissage. La section 4.3 traite d'une expérimentation conçue pour évaluer l'impact de l'adaptation de l'assistance sur les performances, la charge cognitive et l'acceptabilité des opérateurs en comparaison avec une solution d'assistance en réalité augmentée non adaptative. Les résultats de cette étude apportent des éléments de réponses intéressants à la question Q1 tout en soulevant d'autres pistes de réflexion permettant d'approfondir la recherche liée à cette problématique. La section 4.4 présente les résultats d'une expérimentation mettant en œuvre différentes stratégies d'adaptation. La comparaison de l'évolution de la charge cognitive et des performances obtenues dans deux conditions expérimentales mettant en œuvre des stratégies d'adaptation différentes, vise à apporter des éléments de réponse aux questions Q2 et Q3. Les stratégies mises en œuvre dans cette étude diffèrent au niveau de leur flexibilité, c'est-à-dire de la facilité avec laquelle le système déclenche une adaptation. Cette étude s'attarde également sur l'utilité de prendre en compte les préférences des opérateurs afin d'améliorer leurs conditions de travail ainsi que les performances opérationnelles. Enfin, la section 4.5 approfondit le traitement de la question Q4 en abordant deux autres cas d'usages déployés en contexte industriel tout en faisant une synthèse des apports déjà observés sur les systèmes développés à l'aide de la méthodologie, présentés dans les sections 4.3 et 4.4.

Section	Type d'expérimentation	Question adressée
4.3	Expérimentation en laboratoire	Q1
4.4	Expérimentation en laboratoire	Q2, Q3
4.5	Etude de cas industriels	Q4

Tableau 8 : Organisation des sections et des questions adressées

4.2. Pré-étude en contexte industriel

4.2.1. Introduction

Cette première étude de cas illustre la mise en application de la méthodologie décrite dans la partie précédente dans un contexte industriel. Le cas d'usage étudié est un cas d'inspection d'une pièce de structure de train d'atterrissage. L'environnement de maintenance considéré lors de cette étude est un centre de maintenance et de réparation de Safran Landing Systems situé au Royaume-Uni. Cette étude préliminaire permet de mettre en application les différents éléments de la méthodologie afin de concevoir un système d'assistance adaptative en réalité augmentée prenant en compte les besoins et contraintes d'un cas d'usage industriel. Bien que le système développé lors de cette étude ait déjà fait l'objet de démonstrations auprès des opérateurs, son déploiement en atelier n'est pas encore effectif.

Environnement de développement

La création de contenus destinés à la réalité augmentée nécessite l'utilisation de plusieurs logiciels afin de convertir, préparer et mettre en forme les données avant de pouvoir les visualiser et interagir avec elles via la réalité augmentée. Les données tridimensionnelles (3D) telles que les maquettes numériques sont le type de données le plus utilisé dans les applications de réalité augmentée. En effet, ce mode de représentation des informations est tout à fait adapté à la réalité augmentée car il permet de contextualiser ces informations de façon réaliste et crédible grâce à la spatialisation dans l'environnement réel. Ces données sont créées à l'aide d'outils de modélisation 3D tels que CATIA [12], Creo [13], 3DSmax [14] ou Blender [15].

Une fois créées ou récupérées, ces données sont intégrées dans le scénario de réalité augmentée soit en utilisant une solution de développement d'applications et proposant des outils permettant l'intégration et la gestion de fonctionnalités en réalité augmentée comme les moteurs de jeu Unity [18] ou Unreal Engine [19], soit en passant par des logiciels dédiés à la création et à l'édition de scénarios en réalité augmentée tels que Vuforia Studio [20] ou Diota Editor [21].

Enfin, les informations en réalité augmentée sont présentées dans l'application développée spécifiquement ou bien dans une application de lecture des contenus associée à la solution d'édition telles que Diota Player [84] ou Vuforia Engine [85]

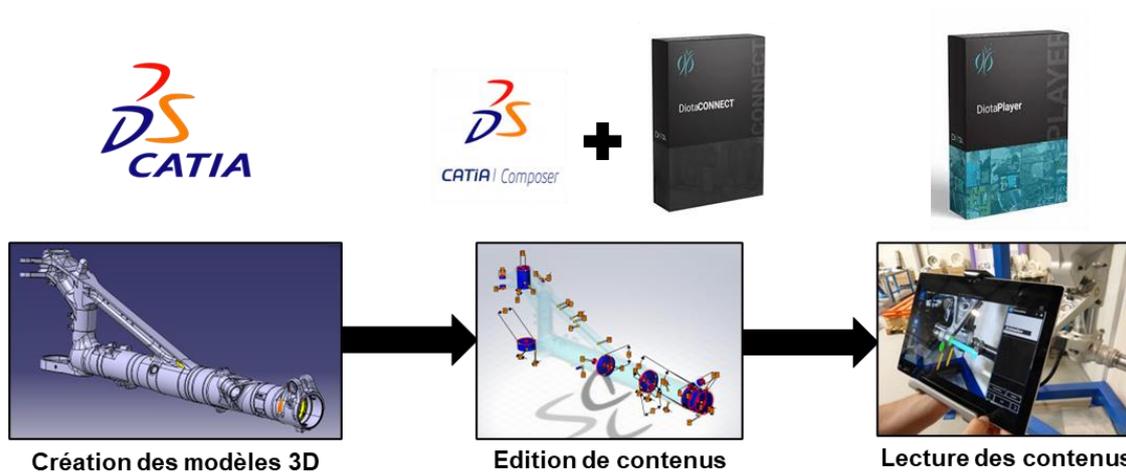


Figure 26 : Pipeline logiciel utilisé dans le développement d'applications de réalité augmentée industrielle

Le pipeline d'application de réalité augmentée utilisé chez Safran (illustré par la Figure 26) se compose, dans l'ordre, de :

- CATIA, logiciel de CAO permettant de concevoir ou d'exporter la donnée 3D des équipements.
- CATIA Composer + Diota Connect for Catia Composer, ensemble logiciel permettant l'édition des contenus destinés aux processus en réalité augmenté.
- Diota Player, logiciel permettant d'exploiter les contenus de réalité augmentée en milieu opérationnel. C'est ce logiciel qui est exécuté sur le dispositif de réalité augmentée retenu pour le cas d'usage.

La chaîne de production de contenus de réalité augmentée étant bien identifiée et mise en place chez Safran, la solution d'assistance adaptative doit donc être compatible avec les contenus et l'écosystème Diota. La solution Diota fonctionne avec un système de scénarios représentant chacun une séquence d'instructions dont le contenu doit être défini en amont, dans un logiciel d'édition dédié. Ainsi, le système proposé dans le cadre de ce cas d'étude s'appuie sur un jeu de scénarios développés avec les logiciels Diota afin de pouvoir proposer différents contenus. L'adaptation des contenus proposés par le système développé consiste donc à lancer différents scénarios selon l'évaluation du profil de l'opérateur.

4.2.2. Cas d'usage et contexte

Dans le cadre de leur maintenance décennale (Figure 28), les trains d'atterrissage sont entièrement révisés. Lors de ce processus, l'atterrisseur est démonté afin que chaque pièce et sous-ensemble puissent être inspectés. Parmi ces pièces, certaines sont critiques car elles sont fortement sollicitées lors de l'exploitation de l'atterrisseur et peuvent être très coûteuses à produire. Il y a donc un véritable enjeu sur le diagnostic et la réparation des pièces de structure afin de contrôler les coûts de maintenance. Les deux pièces comptabilisant le plus grand nombre de dommages et concentrant la plupart des coûts de réparation sont le caisson et la tige coulissante (Figure 27). Le caisson est la pièce la plus grande de l'ensemble du train d'atterrissage. La complexité de la géométrie de cette pièce, notamment la présence de nombreuses surfaces fonctionnelles, représente une quantité d'information importante pour l'opérateur. En effet, lors de l'inspection de cette pièce, l'opérateur est régulièrement amené à effectuer des réparations locales sur ces surfaces et doit ensuite vérifier que les nouvelles dimensions de celles-ci (notamment les diamètres des alésages) respectent les tolérances admissibles dans les limites inscrites dans le manuel de maintenance (CMM). Le CMM étant un document de plusieurs centaines de pages rédigées dans un anglais technique, retrouver ces informations de tolérances représente une charge de travail non négligeable.

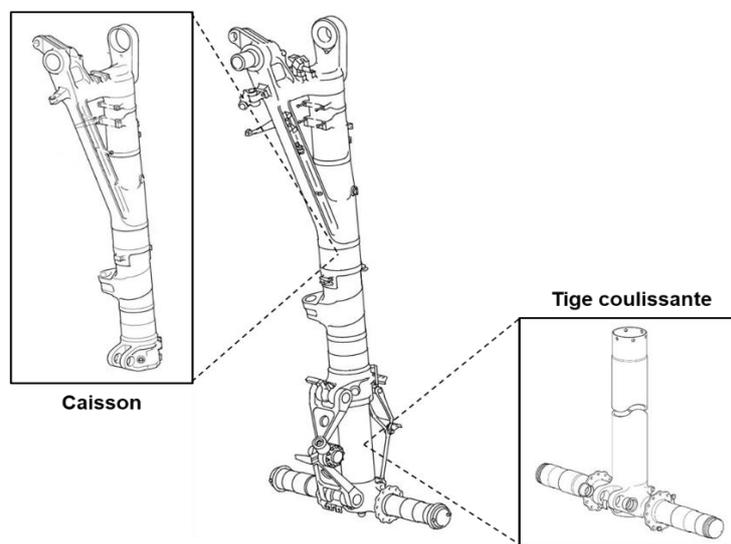


Figure 27 : Train d'atterrissage principal A320 et ses deux pièces de structure

La solution d'assistance proposée dans le cadre de cette étude de cas consiste en une solution de réalité augmentée permettant de visualiser les zones à contrôler ainsi que les informations

de tolérances associées à chacune de ces zones directement sur la pièce inspectée. De cette façon, l'opérateur peut associer facilement la mesure locale des dimensions de chaque zone d'intérêt à ses tolérances admissibles selon la documentation technique de référence.



Figure 28 : Train d'atterrissage à l'arrivée au centre de maintenance (MRO)

4.2.3. Conception du ARAAS

Description de l'opération de maintenance cible

L'opération de maintenance ciblée dans le cadre de cette étude est l'inspection détaillée du caisson de train d'atterrissage principale d'un Airbus A320. Lors de cette opération il est demandé aux opérateurs de localiser et mesurer certaines zones de la pièce afin de vérifier que les dimensions locales de la pièce sont toujours comprises dans les zones de tolérances correspondantes, telle qu'elles sont définies dans la documentation technique (CMM). Dans le cas du caisson, ces zones, au nombre de 33, sont toutes des alésages. L'opérateur doit donc, pour chaque alésage, identifier et localiser celui-ci, mesurer son diamètre, noter cette mesure, trouver la plage de tolérances correspondante dans le CMM puis indiquer si la valeur mesurée est compatible avec les tolérances pour statuer sur la conformité de la pièce. Le seul outil utilisé lors de cette opération est un pied à coulisse numérique. Le caisson, de grandes dimensions, est monté sur un bâti à hauteur d'homme afin que l'opérateur puisse se déplacer librement autour et ainsi accéder à l'ensemble des zones à inspecter. Toutes ces informations sont compilées dans le Tableau 9.

Caractéristiques	Types / Niveaux
Nombre d'actions	132
Natures des tâches	Identifier, Localiser, Mesurer, Annoter
Nombre d'outils	1
Nombre de pièces à identifier	1
Nombre de zones d'intérêt à identifier	33
Nombre de pièces à manipuler	0
Taille du produit	Grand
Utilisation des mains	Une main utilisée

Tableau 9 : Caractéristiques des tâches du cas d'usage

Sélection des éléments ajustables

Bien qu'il n'y ait qu'une seule pièce inspectée dans le cas d'étude considéré, les dimensions importantes, la géométrie complexe et le nombre conséquent (plus d'une trentaine) de points de contrôle à inspecter rendent la tâche difficile à appréhender pour les opérateurs les moins expérimentés. Le système d'assistance doit donc principalement moduler la quantité d'information présentée aux opérateurs selon leurs profils d'expertise. Il est ainsi préférable de ne pas présenter simultanément les 33 points de contrôle pour les opérateurs les moins expérimentés. Cela nous conduit donc à séquencer la procédure d'assistance en une succession de 15 étapes dont la densité d'information reste contenue à moins de 6 points de contrôle par étape. Chacune de ces étapes ne comporte que des points de contrôle situés dans une zone restreinte de la pièce. Cette première procédure constitue le premier scénario d'assistance que nous appelons « Scénario séquentiel ». Celui-ci est représenté sur la partie gauche de la Figure 29. Le deuxième scénario reprend l'ensemble des informations présentées dans le scénario séquentiel mais celles-ci sont alors toutes représentées dans une seule et même étape, de façon simultanée. Ce scénario, baptisé « Scénario vue d'ensemble » et présenté sur la partie droite de la Figure 29, est destiné aux profils les plus expérimentés car il nécessite une bonne connaissance de la pièce inspectée. Ce scénario doit ainsi permettre de s'affranchir de la

structure séquentielle pouvant représenter une contrainte et une perte de temps pour les opérateurs expérimentés qui ont moins de difficultés à localiser les zones à inspecter.

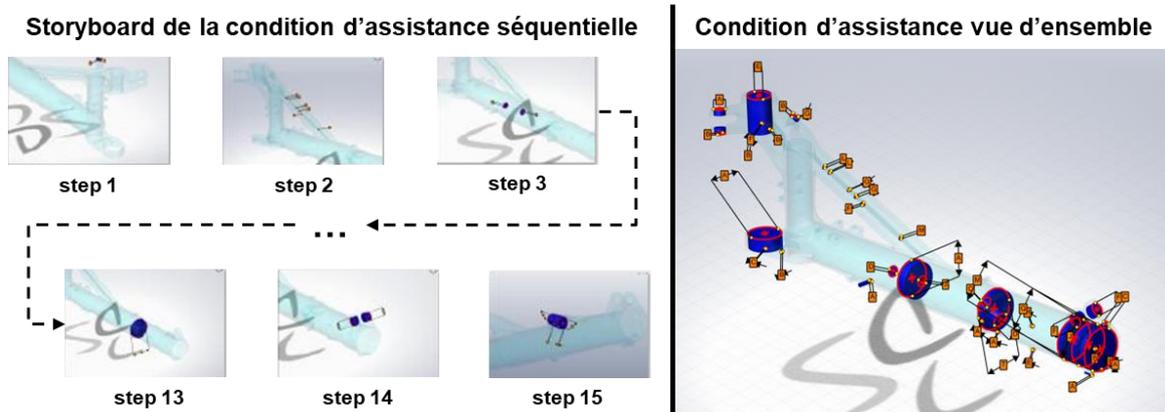


Figure 29 : Aperçu des deux conditions d'assistance à l'inspection

Dans les deux cas, les modes d'informations et l'apparence de ces informations restent les mêmes. Les zones à inspecter sont représentées par un cylindre en 3D représentant l'alésage concerné. Une étiquette 3D est également attachée à la zone. Celle-ci porte la référence de la zone telle que présente dans le CMM. Ces indications 3D sont visibles dans la partie gauche de l'interface présentée sur la Figure 30. Les informations de tolérances sont affichées dans le volet de droite lorsque l'opérateur sélectionne une zone. Pour la condition d'assistance séquentielle, chaque étape comporte également une illustration issue du CMM représentant les zones à inspecter.

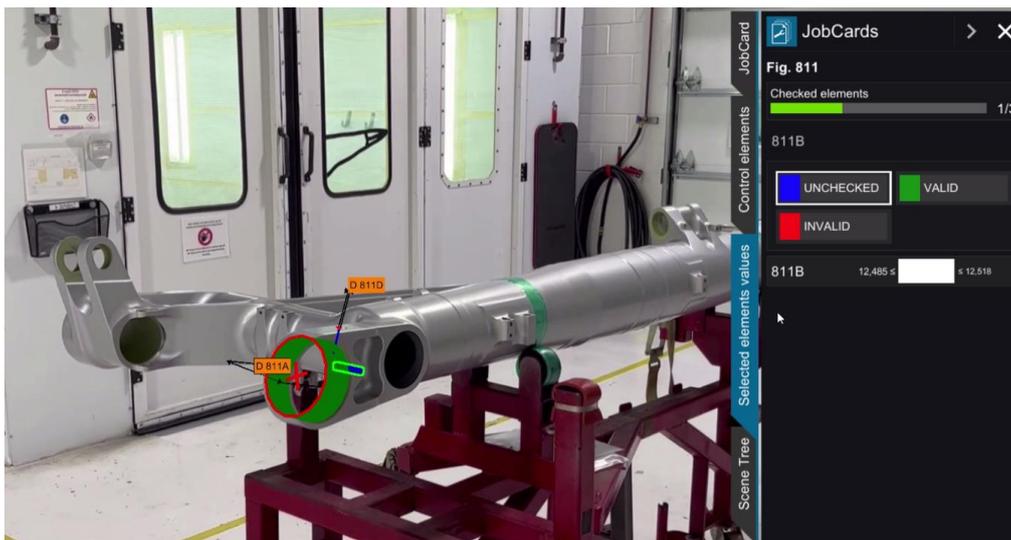


Figure 30 : Essai en atelier (vue d'une des étapes du scénario séquentiel)

Sélection des indicateurs disponibles

Pour ce cas d'application, le système utilise le temps d'exécution comme indicateur de performances de l'opérateur. Cette information est enregistrée lors de l'exécution de l'application et peut facilement être récupérée au format XML.

Caractéristiques	Niveaux
Effort physique	1
Communication orale	0
Mobilité	2
Durée de la tâche	3
Contraintes éthiques	3

Tableau 10 : Evaluation des contraintes du cas d'usage pour la sélection des indicateurs

Afin de déterminer les indicateurs de charge cognitive pertinents et utilisables pour ce cas d'usage, nous avons fait appel aux inspecteurs et au responsable du processus concerné pour évaluer les caractéristiques de l'opération d'inspection. Les résultats de cette évaluation sont présentés dans le Tableau 10. En utilisant les formules présentées dans la section (3.3.3) on obtient, pour chaque type d'indicateur, les résultats suivants :

$$I_{T/gaze} = \sum_{i=1}^n IF_{T/gaze} * \alpha_i = 0 * 1 + 0 * 0 + 0 * 2 + 2 * 3 + 1 * 3 = 9$$

$$\text{Et donc } S_{gaze} = 1 - \frac{5}{9} = 0.44$$

De la même façon on a : $S_{cardiac} = 0.29$; $S_{respiratory} = 0.72$; $S_{brain} = 0.36$

D'après notre modèle de calcul développé dans la section 3.3.3 de la partie précédente, la typologie d'indicateurs ayant le score le plus bas est celle étant, a priori, la mieux adaptée au cas d'usage cible. La mesure de la charge cognitive via le suivi de l'activité cardiaque semble donc être l'option la plus pertinente pour notre cas d'usage.

Conception de la stratégie d'adaptation

L'adaptation des contenus délivrés par le système d'assistance intervient à deux niveaux. Premièrement, le niveau d'expertise des opérateurs est évalué au travers des performances (elles-mêmes évaluées par la mesure du temps d'exécution) et de la charge cognitive (mesure de la variabilité du rythme cardiaque). Cela permet de déterminer lequel des deux scénarios doit être présenté à l'opérateur. Si les performances sont faibles et/ou la charge cognitive élevée, alors c'est le scénario séquentiel qui est lancé. Dans le cas contraire, si les performances sont satisfaisantes et que la charge cognitive n'augmente pas de façon significative, alors le système lance le scénario ne comportant que la vue d'ensemble. Le deuxième niveau d'adaptation ne concerne que le scénario séquentiel puisqu'il fait intervenir l'ordre de la séquence comme élément ajusté. Cette deuxième composante d'adaptation se base sur l'historique de navigation de l'opérateur dans la séquence afin de proposer, lors de sessions de travail ultérieures, une séquence de travail plus adaptée à ses préférences. Cela doit permettre d'éviter une potentielle augmentation de la charge cognitive pouvant être due à un agencement des étapes inadapté à la méthode de travail privilégiée par l'opérateur.

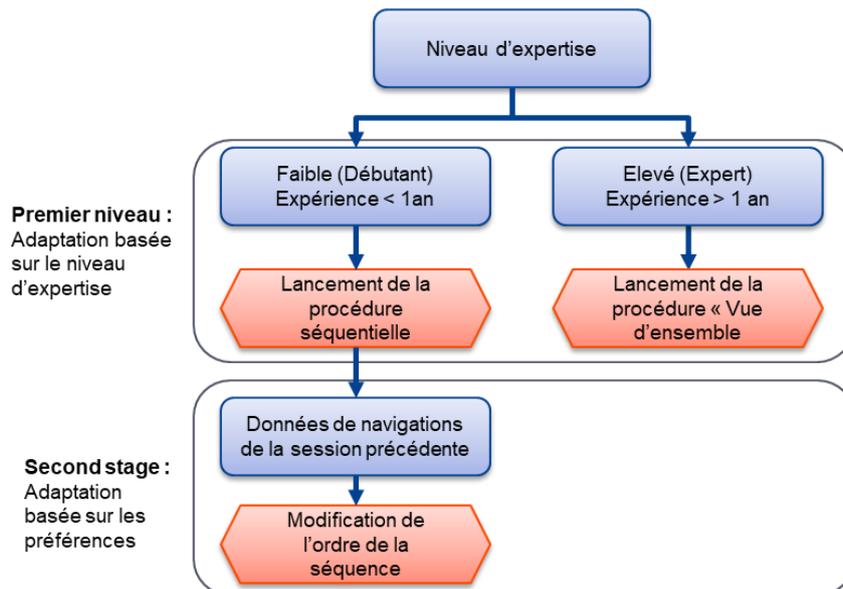


Figure 31 : Stratégie d'adaptation

4.2.4. Retour des opérateurs

Le dispositif développé pour ce cas d'étude a été testé en atelier de maintenance par trois inspecteurs dont le niveau d'expertise était différent (un expert et deux moins expérimentés). La réception générale de ce dispositif d'assistance fut bonne pour les trois inspecteurs. Tous ont témoigné de l'utilité du système pour l'opération concernée, notamment sur l'identification des tolérances associées à la zone mesurée. Les trois inspecteurs ont pu essayer les deux scénarios. Les trois inspecteurs ont noté leur préférence pour le scénario lié à leur profil (c.-à-d. scénario séquentiel pour les deux inspecteurs moins expérimentés et le scénario vue d'ensemble pour l'expert). Enfin l'utilisation de ce système a permis de réduire le temps d'inspection d'environ 41 minutes en moyenne, ce qui représente près de 10% du temps d'inspection totale pour la pièce concernée (6.79 heures). D'après nos observations, cette amélioration des performances opérationnelles est attribuable à la réduction du temps nécessaire pour chercher les informations dans le CMM.

Inspecteur	Profil d'expertise	Condition d'assistance préférée
1	Expert	Vue d'ensemble
2	Intermédiaire	Assistance séquentielle
3	Intermédiaire	Assistance séquentielle

Tableau 11 : Retour des opérateurs après essai des deux conditions d'assistance

En conclusion, le système mis en œuvre semble répondre aux besoins de chacun en termes d'assistance à l'opération d'inspection considérée. L'utilisation de ce système a également permis une amélioration du temps d'exécution sur l'opération d'inspection. Toutefois, il conviendrait de vérifier si ces premiers résultats se confirment sur le long terme (après plusieurs mois d'utilisation afin d'avoir un nombre de cas traités suffisant). Ces résultats restent préliminaires et une étude plus spécifique de l'impact de l'adaptation de l'assistance en réalité augmentée est nécessaire afin de vérifier pertinence de la méthodologie développée et illustrée ici. La section suivante développe le traitement de cet impact au travers d'une étude mise en place grâce à la méthodologie développée.

4.3. Evaluation de l'impact de l'adaptation des contenus

4.3.1. Introduction

Cette expérimentation vise à répondre à la question de recherche suivante :

Q1 : L'adaptation des contenus a-t-elle un impact sur la charge cognitive et sur les performances de l'opérateur comparée à une assistance en réalité augmentée non-adaptative ?

Pour répondre à cette question nous proposons de mettre en œuvre une assistance à une opération d'inspection visuelle. Deux conditions sont définies afin de pouvoir comparer l'impact d'une assistance non-adaptative avec celui d'une assistance adaptative au niveau de la gestion de la charge cognitive des opérateurs et des performances opérationnelles obtenues.

4.3.2. Support expérimental

Cas d'usage

Dans le cadre de cette étude, l'opération de maintenance considérée est l'inspection visuelle de la tige coulissante d'un train d'atterrissage principal d'un avion A320. Lors de cette opération, l'opérateur doit identifier, localiser et caractériser les dommages présents sur la pièce. L'identification du dommage consiste simplement à déterminer, parmi les anomalies observables à la surface de la pièce, lesquelles pourraient traduire une altération significative des propriétés locales de la pièce et susceptible de compromettre le bon fonctionnement de la pièce et donc de l'équipement donc elle fait partie. La localisation d'un dommage consiste à déterminer et repérer la position du dommage dans un repère en deux dimensions (plans de la pièce) ou trois dimensions (maquette 3D de la pièce). Enfin, la caractérisation d'un dommage regroupe plusieurs tâches comme la catégorisation (de quelle nature est le dommage ?) ou la mesure dimensionnelle. Le cadre de cette étude limite cette caractérisation à la catégorisation des dommages entre deux types de dommages (corrosion et rayure).

Dispositif expérimental

La solution matérielle utilisée pour fournir une assistance à l'opération d'inspection est un visiocasque Hololens 2. Ce support permet, grâce à ses capteurs intégrés, de récupérer de nombreuses informations sur le comportement de l'utilisateur. Dans cette étude, ce qui nous

intéresse plus particulièrement est le suivi du regard de l'utilisateur car, comme nous le verrons un peu plus bas (voir Figure 34), ces informations doivent servir à piloter une partie de l'adaptation des contenus. L'application logicielle est développée sous le moteur 3D Unity en utilisant le kit de développement dédié à la réalité mixte fourni par Microsoft (MRTK) [86].

Éléments ajustables par le système

Afin de proposer une assistance adaptée aux différents utilisateurs, le système peut modifier les éléments suivants de l'expérience : la quantité d'informations présentées, le design de ces informations et les modes d'interaction disponibles. L'ajustement de ces éléments passe concrètement par des modifications d'affichage de certains composants ou fonctionnalités de l'application d'assistance en réalité augmentée. Ces composants de l'application sur lesquels le système d'adaptation peut intervenir sont au nombre de cinq. Ils sont illustrés sur la Figure 32. On y retrouve un panneau d'informations textuelles précisant les actions à effectuer pour mener à bien l'opération d'inspection. Le deuxième composant consiste en un panneau présentant des images en 2D représentant des dommages types pour les deux catégories de dommages à identifier (rayures et corrosion). Le troisième composant est l'interface utilisateur comportant les fonctionnalités relatives à la localisation et à la caractérisation des dommages ainsi que les réglages relatifs à l'affichage d'informations en 3D. Enfin, les quatrième et cinquième composants sont les informations 3D superposées à la pièce réelle à l'aide de la réalité augmentée. Ces informations permettent de localiser la zone critique à inspecter sur la pièce. Si ces deux composants participent bien à transmettre la même information (c.-à-d. la localisation de la zone à inspecter), ils représentent finalement deux approches différentes pour y parvenir. En effet, la zone rouge (repère 4 sur la Figure 32) est directement superposée à la zone à inspecter tandis que la zone blanche (repère 5 sur la Figure 32) est utilisée pour masquer toute la surface de la pièce qui n'est pas inspectée afin que l'utilisateur contrôle la surface de la pièce uniquement dans les limites de la zone à inspecter. Précisons que, contrairement à ce qui est illustré en Figure 32, ces deux zones ne sont pas visibles simultanément car elles représentent deux façons complémentaires de transmettre la même information. Notons enfin que ces deux approches sont introduites aux participants lors d'une phase de tutoriel afin qu'ils puissent assimiler leur fonctionnement avant la phase d'inspection sur la pièce réelle.

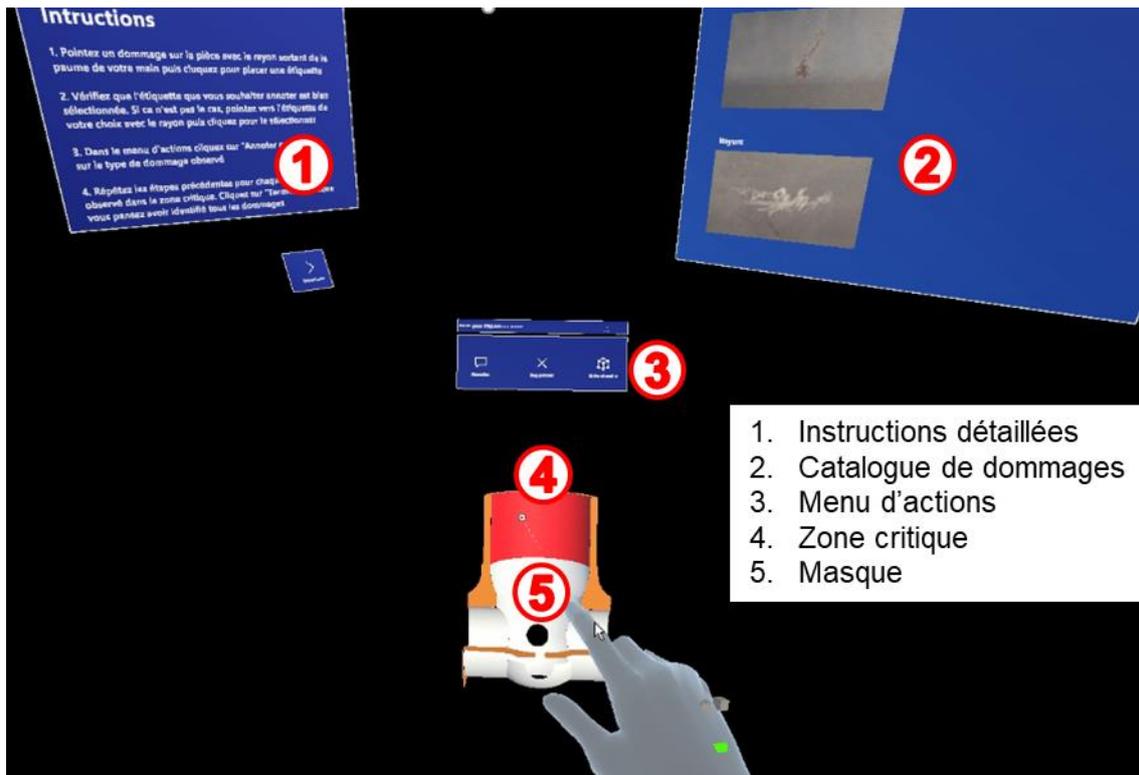


Figure 32 : Eléments ajustables de l'application (vue virtuelle de la phase d'inspection)

Maintenant que nous avons passé en revue les composants de l'application sur lesquels le système intervient pour mettre en œuvre l'adaptation, voyons en détails comment l'ajustement des éléments cités au début du paragraphe précédent sont mis en œuvre concrètement. Tout d'abord, la quantité d'informations est modulée en affichant ou en désactivant les panneaux contenant les informations textuelles et les images 2D des dommages types. La gestion de cette quantité d'information doit permettre de ne pas surcharger l'utilisateur et d'éviter la distraction de celui-ci avec des informations dont il n'aurait pas/plus besoin pour exécuter l'opération. L'ajustement du design des informations intervient sur les augmentations 3D permettant d'identifier la zone à inspecter. Ainsi, le système est capable de modifier l'opacité de la zone critique (en rouge sur la Figure 32). En la rendant plus ou moins transparente, cela permet de visualiser à la fois la délimitation de la zone à inspecter et l'état de la surface de la pièce. On peut également noter que le choix de présenter la zone 4 ou la zone 5 (voir Figure 32) contribue aussi à l'ajustement du design de l'information de la localisation de la zone à inspecter. Enfin, l'ajustement des modes d'interaction est permis par le choix d'interface du menu d'action (noté 3 sur la Figure 32). En effet, deux modes d'interaction sont possibles au sein de l'application. Le premier (à gauche sur la Figure 33) présente un menu flottant dans l'environnement de

réalité augmentée. L'utilisateur peut interagir à distance avec les éléments de ce menu en les pointant avec un faisceau émanant de la pomme de la main. Le deuxième type d'interface proposé (à droite sur la Figure 33) prend la forme d'un menu suivant le déplacement de la main non dominante de l'utilisateur afin que celui-ci reste toujours à portée et facile d'accès. Dans cette configuration l'utilisateur interagit avec les éléments du menu en appuyant directement sur les boutons avec l'index.

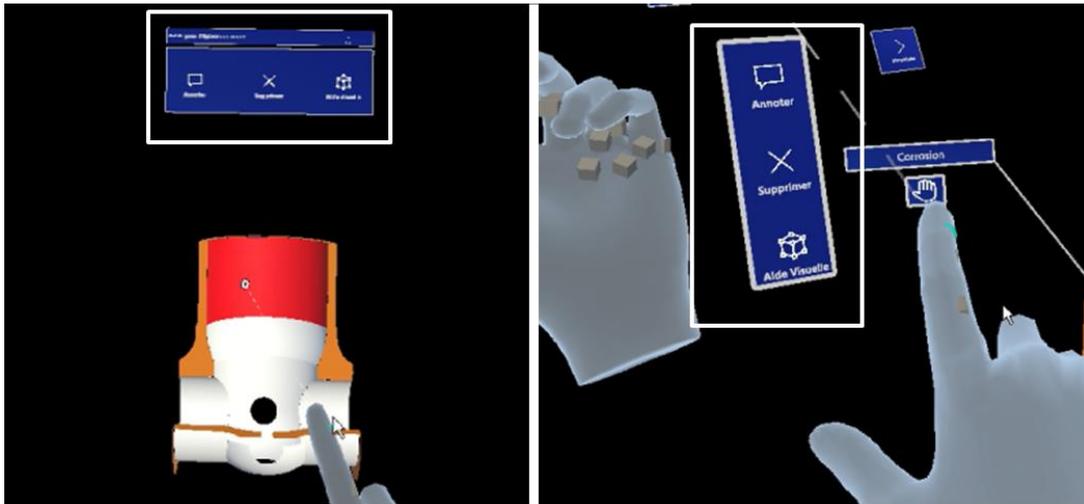


Figure 33 : Les deux types d'interface proposés au sein de l'application

Le recours aux panneaux d'informations pour diffuser les informations textuelles (1) et les images (2) s'appuie sur les résultats mis en avant par Gattullo et al. [67], spécifiant notamment qu'un contraste élevé entre les couleurs du texte et du panneau permettent une meilleure lisibilité des informations. La disposition des différents éléments d'informations est pensée pour minimiser les changements de distance focale afin de préserver l'utilisateur d'une éventuelle fatigue oculaire pouvant alors induire une diminution des performances [87, 88].

Indicateurs d'évaluation des caractéristiques de l'utilisateur

Lors de la première session d'inspection, le système enregistre un certain nombre de paramètres servant à évaluer les performances, la charge cognitive et les préférences de travail des utilisateurs. Les performances sont évaluées par la mesure du temps d'exécution sur l'ensemble de l'opération d'inspection et le décompte du nombre de dommages correctement identifiés dans la zone à inspecter. La charge cognitive est évaluée au travers du suivi du regard de l'utilisateur. Ce suivi est rendu possible par le capteur dédié au sein de l'Hololens 2. Les

indicateurs associés à ce suivi sont la durée de séjour sur des zones d'intérêt prédéfinies et le nombre de fixations sur ces mêmes zones d'intérêt. Deux de ces zones d'intérêt incluent les deux panneaux affichant les instructions textuelles et les images 2D des dommages types tandis qu'une troisième englobe la pièce réelle. Enfin, les préférences utilisateur enregistrées par le système concernent l'affichage ou non de la zone critique en réalité augmentée ou du masque, l'opacité de l'indication 3D de la zone critique et enfin le type de menu utilisé pour interagir avec l'application.

Stratégie d'adaptation

La stratégie d'adaptation mise en œuvre par le système développé associe le pilotage de la modification de chaque composant ajustable de l'application à une caractéristique précise de l'opérateur. Ainsi, comme l'illustre la Figure 34, l'affichage des instructions textuelles est piloté par les paramètres liés aux performances de l'opérateur. L'affichage du panneau faisant office de catalogue de dommages types est piloté par l'évaluation de la charge cognitive réalisée par le suivi de l'activité du regard de l'utilisateur. Enfin, le choix du type d'interface, l'affichage ou non des zones 3D augmentées (zone critique et masque) ainsi que l'opacité de la zone 3D représentant la zone critique (c.-à-d. la zone à inspecter) sont déterminés par l'évaluation des préférences utilisateur concernant ces éléments de l'application.

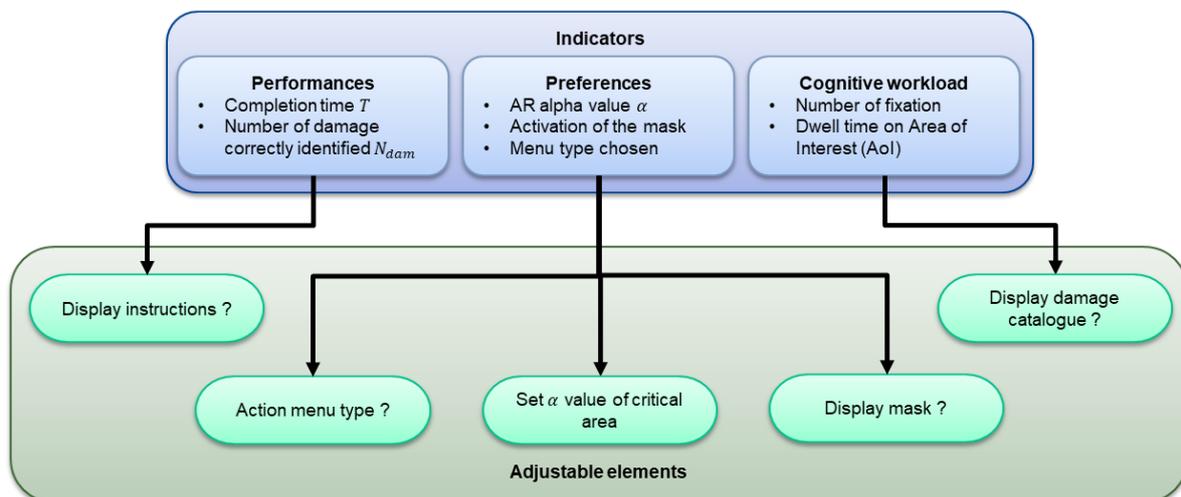


Figure 34 : Liens entre les éléments ajustables et les indicateurs évaluant les paramètres de l'utilisateur

4.3.3. Protocole expérimental

Avant de démarrer l’immersion dans l’environnement d’assistance en réalité augmentée, le participant est informé du déroulé de l’expérimentation. Le participant est ensuite équipé du casque Hololens 2. L’expérimentation en réalité augmentée est composée de deux sessions (figure 34). La première session débute avec une phase de tutoriel afin que le participant puisse se familiariser avec la technologie du casque Hololens, notamment les interactions gestuelles, et avec les fonctionnalités spécifiques à l’application d’inspection. Ces fonctionnalités sont introduites une par une au moyen d’informations textuelles et sont mises en application sur un cube virtuel servant de support d’entraînement pour placer des étiquettes indiquant la localisation de dommages.

À l’issue de ce tutoriel, la première session se poursuit avec l’exécution de la tâche d’inspection visuelle. Lors de cette phase, le participant est invité à localiser et catégoriser autant de dommages que possible dans la zone critique identifiable grâce au modèle 3D diffusé par réalité augmentée. La première session se termine lorsque le participant estime avoir trouvé tous les dommages. La deuxième session débute ensuite. Le participant est alors invité à réitérer l’inspection de la pièce sans repasser par la phase de tutoriel. Pour finir, une fois cette deuxième session complétée et après avoir retiré le casque Hololens 2, le participant remplit le questionnaire NASA-TLX.

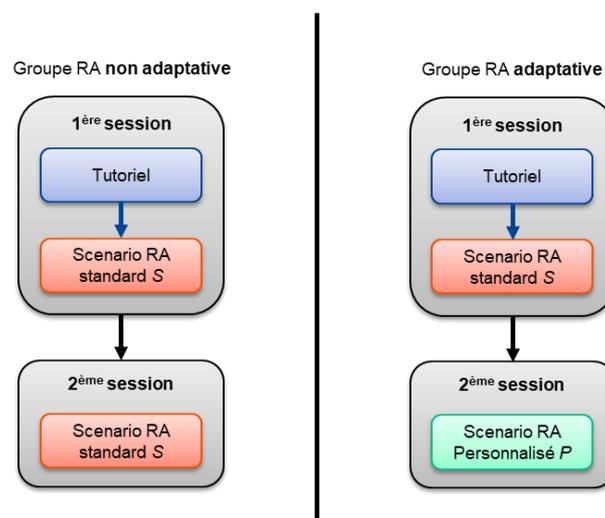


Figure 35 : Déroulé détaillé pour les deux groupes

Afin de mesurer l'impact de l'adaptation des contenus par rapport à une solution d'assistance non-adaptative, nous proposons de constituer deux groupes de participants confrontés à deux conditions expérimentales différentes. Un premier groupe expérimente donc une solution de RA non adaptative, c'est-à-dire dont le scénario d'assistance n'évolue pas entre les deux sessions. Le deuxième groupe, quant à lui, expérimente la solution de RA adaptative. Le scénario présenté lors de la première session est identique à celui présenté au premier groupe tandis que celui présenté lors de la deuxième session est modifié en fonction des performances, de la charge cognitive et des préférences des participants. La configuration initiale des composants présentés dans l'application lors de l'exécution du scénario standard (appelé Scénario S sur la Figure 35) est la suivante : les panneaux d'instructions textuelles et d'images 2D de défauts types (référencés 1 et 2 sur la Figure 32) sont affichés. Le menu affiché est le menu suivant le mouvement de la main (à gauche sur la Figure 33). La zone critique (4 sur la Figure 32) est affichée tandis que le masque (5 sur la Figure 32) est désactivé.

4.3.4. Résultats

Au total, quinze participants ont pris part à cette expérimentation. Tous les participants ont le même profil étudiant ingénieur. Sept participants ont expérimenté l'application ne proposant pas d'adaptation tandis que les huit participants restant ont expérimenté l'application proposant une adaptation. Les résultats de cette expérimentation sont contrastés. Tout d'abord, concernant les performances, on observe une réduction du temps d'exécution entre la première et la deuxième session (43% pour l'assistance non adaptative et 45% pour l'assistance adaptative) qui reste sensiblement similaire dans les deux conditions. Toutefois, une amélioration notable du nombre de dommages relevés apparaît en faveur de l'assistance adaptative puisque tous les participants du groupe ayant expérimenté ce système sont parvenus à identifier les six dommages critiques présents sur la pièce alors qu'il n'était que 7/9 dans l'autre groupe.

Les résultats du NASA-TLX (Figure 36) indiquent que la demande temporelle ($p=0.044$) ainsi que la frustration ($p=0.034$) sont significativement plus importantes pour les participants du groupe ayant bénéficié d'une adaptation de l'assistance. Notons qu'on peut également observer une augmentation plus modérée de la charge cognitive globale et de ses autres composantes, à l'exception de la demande physique (attendu car l'assistance proposée n'est pas censée intervenir sur cette composante), lors de l'utilisation de l'adaptation. Notons toutefois que, dans

les deux conditions expérimentales, la charge cognitive globale reste en dessous de 30, ce qui, selon les travaux de [72], est bien en dessous de la moyenne constatée pour ce domaine d'activité qui est de 45.

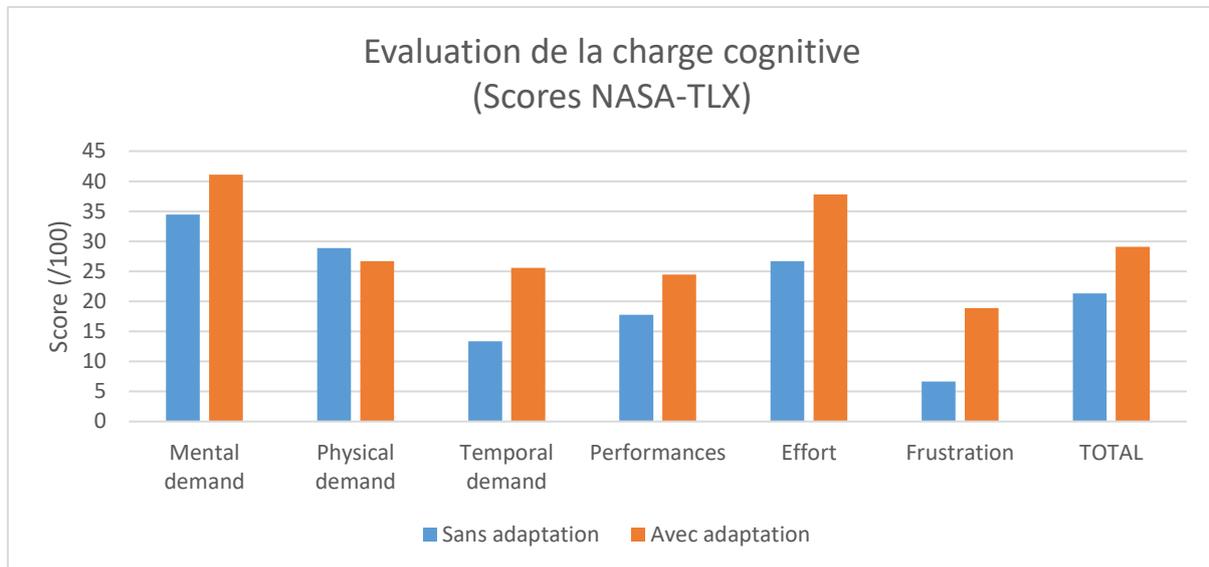


Figure 36 : Evaluation subjective de la charge cognitive (résultats du questionnaire NASA-TLX)

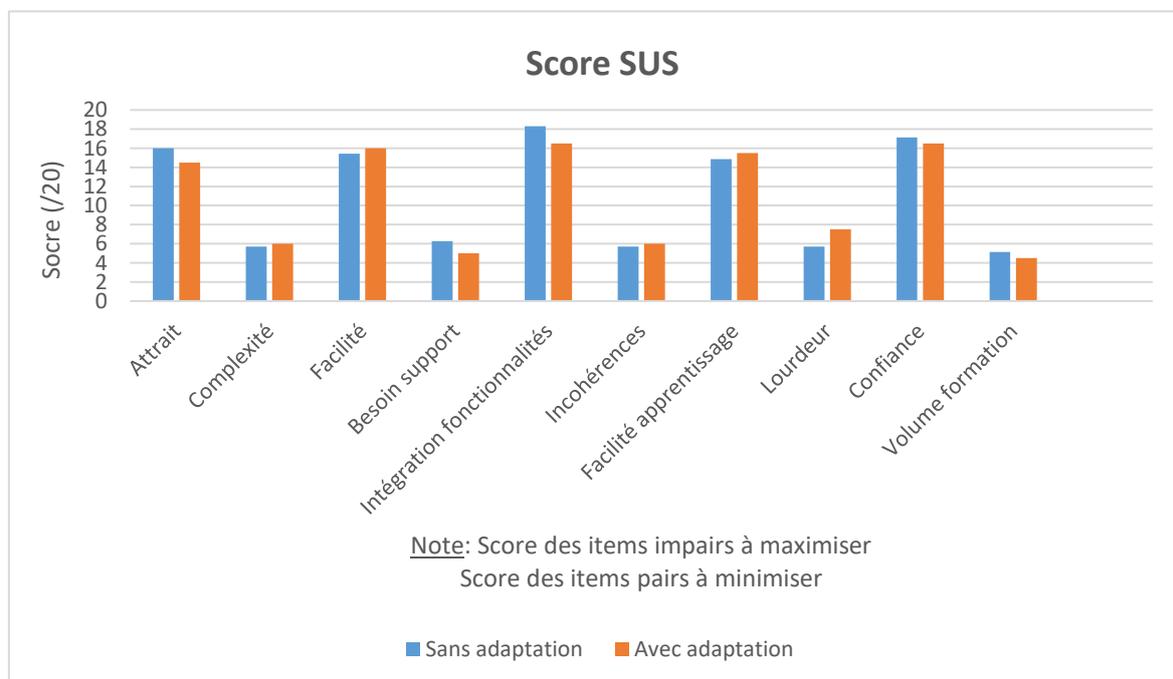


Figure 37 : Evaluation de l'expérience utilisateur (scores attribués par les participants via le questionnaire SUS)

Les résultats du SUS (voir Figure 37) ne mettent en évidence aucune différence significative ($p=0.69$) entre l'expérience utilisateur du système non adaptatif et celle du système adaptatif. Par ailleurs, les scores globaux (87/100 pour l'assistance non adaptative et 85/100 pour l'assistance adaptative) sont tous deux très bons sachant qu'un système est considéré comme très performant lorsque ce score dépasse 75/100.

Synthèse

En conclusion, les résultats de cette étude montrent que l'introduction de l'adaptation dans un système d'assistance en réalité augmentée peut permettre d'améliorer les performances en termes de qualité (ici le nombre de dommages correctement identifiés). Cependant les résultats semblent également indiquer que l'ajout de l'adaptation de l'assistance délivrée par un système d'assistance en réalité augmentée peut entraîner une augmentation de la charge cognitive, tout du moins en ce qui concerne la demande temporelle et la frustration. Cet effet pourrait être dû à une stratégie d'adaptation trop complexe. En effet, il est possible que les effets de l'ajustement des différents composants de l'application présentent une interdépendance rendant la configuration de la stratégie d'adaptation plus difficile à maîtriser. Il pourrait être pertinent de simplifier cette stratégie et d'étudier à nouveau son impact sur la charge cognitive en comparaison de celle présentée dans cette étude. Par ailleurs, la multiplication des éléments ajustés par le système d'adaptation, pourrait aussi rendre le processus d'adaptation plus visible aux yeux de l'utilisateur et ainsi induire une certaine incompréhension. Cela pourrait être corrigé en rendant le processus d'adaptation moins visible, en diminuant soit son ampleur (c.-à-d. diminuer le nombre d'ajustements), soit sa fréquence (c.-à-d. en laissant le temps à l'utilisateur d'oublier les détails de l'expérience d'assistance). Cette incompréhension de l'ajustement de l'expérience d'assistance pourrait aussi être atténuée en expliquant tout simplement à l'utilisateur les raisons régissant les changements visibles. Toutefois cela représenterait aussi un apport d'information supplémentaire qui pourrait finalement alourdir la charge cognitive de l'utilisateur.

Finalement, les éléments de réponses apportés à la question Q1 (l'adaptation des contenus a-t-elle un impact sur la charge cognitive et sur les performances de l'opérateur comparée à une assistance en réalité augmentée non-adaptative ?) suggèrent, dans le cadre de cette étude, que l'adaptation peut entraîner une élévation de la charge cognitive sans pour autant que cela se traduise en une dégradation des performances.

4.4. Comparaison de différentes stratégies d'adaptation

4.4.1. Introduction

Cette expérimentation a été conçue pour traiter les questions de recherche Q2 et Q3 :

Q2 : L'impact du système d'assistance adaptative sur les performances et la charge cognitive de l'utilisateur diffère-t-il selon la stratégie mise en place pour adapter les contenus ?

Q3 : La prise en compte systématique des préférences des opérateurs peut-elle diminuer la charge cognitive de l'utilisateur sans nécessairement dégrader ses performances ?

Afin de répondre à la question Q2, nous proposons de développer et mettre en œuvre deux stratégies d'adaptation afin de comparer les résultats obtenus par l'une et par l'autre à la fois en termes de performances opérationnelles et de charge cognitive des utilisateurs. Les deux stratégies développées diffèrent au niveau de leur flexibilité. Nous définissons la flexibilité d'une stratégie d'adaptation comme une caractéristique représentant la propension qu'a le système d'assistance adaptative à proposer des ajustements des contenus pour une évolution donnée des indicateurs caractérisant l'opérateur (en termes de performances et de préférences). Il est ainsi possible de faire varier la flexibilité d'une stratégie d'adaptation en fonction des contraintes de déclenchement de l'adaptation représentées par les règles régissant les liens entre les indicateurs d'évaluation des caractéristiques des opérateurs et la modification des éléments ajustables du système d'assistance adaptative. Ainsi, afin de répondre à la question Q2, nous nous intéressons, dans le cadre de cette étude, à la question suivante :

Q2* : Quel est l'impact de la flexibilité du mécanisme d'adaptation sur les performances et la charge cognitive de l'opérateur ?

Les hypothèses que nous formulons pour répondre à cette question sont les suivantes :

H1 : Une plus grande flexibilité du mécanisme d'adaptation permet de réduire la charge cognitive de l'opérateur comparée à une flexibilité moins importante.

H2 : Une plus grande flexibilité du mécanisme d'adaptation permet, à minima, de maintenir le même niveau de performances de l'opérateur comparée à une flexibilité moins importante.

Afin de répondre à la question Q3, les deux stratégies d'adaptation étudiées dans le cadre de cette expérimentation diffèrent également au niveau de la prise en compte des préférences de l'opérateur pour l'adaptation de l'assistance. Ainsi, comme cela sera détaillé dans la section suivante, une première stratégie conditionne la prise en compte des préférences selon les performances obtenues par l'opérateur tandis que la deuxième stratégie propose une prise en compte systématique de ses préférences.

L'hypothèse formulée pour répondre à Q3 est la suivante :

H3 : La prise en compte systématique des préférences pour l'adaptation de l'assistance permet de diminuer la charge cognitive de l'opérateur sans dégrader ses performances.

4.4.2. Support expérimental

L'opération de maintenance cible de cette étude est une opération d'inspection visuelle d'une pièce de structure de train d'atterrissage. Il s'agit plus exactement d'une section de la tige coulissante d'un train d'atterrissage principal d'A320.

Les éléments ajustables sélectionnés pour l'adaptation dans cette application sont le design, la quantité et les modes d'informations.

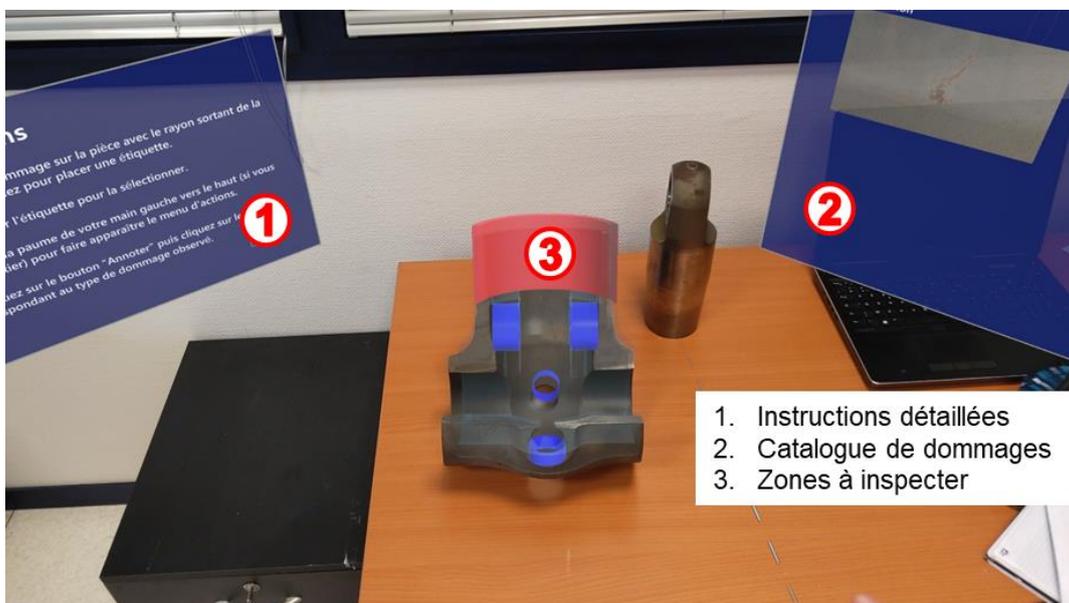


Figure 38 : Vue d'ensemble de l'application d'assistance en réalité augmentée

La Figure 38 présente la procédure d'assistance en réalité augmentée selon le point de vue de l'utilisateur. On y retrouve plusieurs éléments d'information présentés pour guider l'utilisateur dans sa tâche. Le panneau d'instructions (1 sur la figure) récapitule, sous forme textuelle, les consignes de la tâche (les objectifs) ainsi que les interactions et manipulations à effectuer pour compléter la tâche (les moyens de mener à bien ses objectifs). Le catalogue de dommages (2) fournit des représentations 2D d'exemples des différents types de dommages à identifier. Enfin, les augmentations 3D (c.-à-d. les modèles 3D superposés à la pièce réelle grâce à la réalité augmentée) (3) sont là pour aider l'utilisateur à localiser les zones d'intérêt sur la pièce réelle. En effet, dans le cadre de cette étude, il est demandé à l'utilisateur de concentrer son attention dans la zone rouge, considérée comme une zone critique dans laquelle aucun dommage significatif ne doit être oublié. Les choix concernant les couleurs et la disposition des éléments virtuels suivent les mêmes recommandations que celles citées dans la section 4.3.2.

Première stratégie d'adaptation : Gestion séquentielle des performances et des préférences

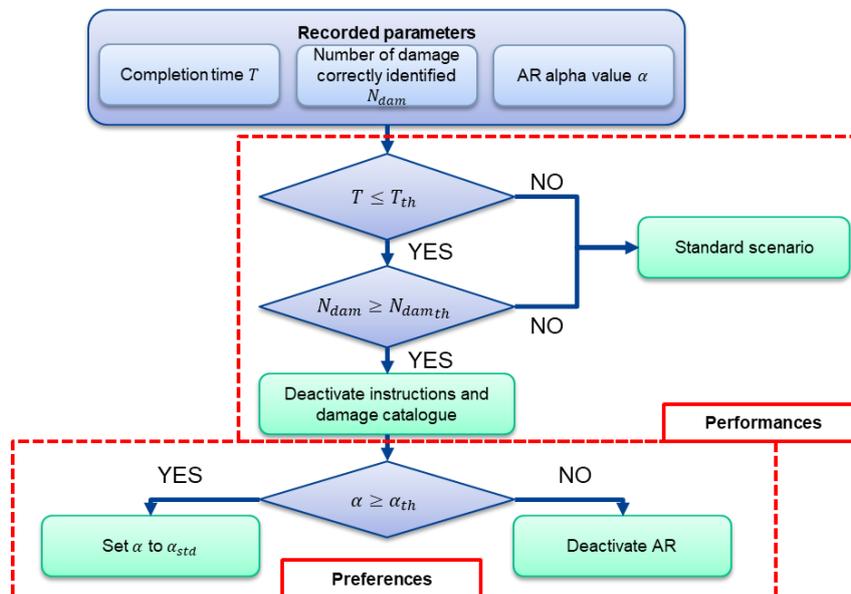


Figure 39 : Stratégie d'adaptation A (flexibilité faible)

La première stratégie d'adaptation (A) présentée en Figure 39 évalue les caractéristiques de l'opérateur de façon séquentielle. Le système évalue d'abord les performances de l'opérateur au cours de la session qui vient de se dérouler. Si les performances en temps (temps de complétion T) ou en qualité (nombre de dommage N_{dam}) sont en deçà de seuils correspondants

(respectivement T_{th} et $N_{dam_{th}}$), alors le système (ré)active les instructions textuelles et le catalogue de dommages sans poursuivre avec l'évaluation des préférences. Ainsi l'évaluation ou non des préférences est conditionnée par les performances de l'opérateur. Si les performances sont jugées suffisantes (c.-à-d. $T \leq T_{th}$ et $N_{dam} \geq N_{dam_{th}}$) alors le système va tenir compte des préférences de visualisation des augmentations 3D de l'opérateur. Le système se base alors sur l'opacité α des augmentations 3D réglée par l'opérateur pour déterminer si l'opérateur préfère visualiser les augmentations 3D en transparence ou s'il préfère les masquer puis les afficher à nouveau si besoin. Le réglage manuel n'ayant pas une précision absolue, un seuil de visibilité α_{th} est utilisé pour identifier si le modèle 3D est masqué ou visible. Ainsi, pour $\alpha < \alpha_{th}$ l'augmentation 3D est considérée comme masquée. Dans ce cas, l'affichage de l'augmentation 3D est désactivé lors de la prochaine session. À l'inverse, si $\alpha \geq \alpha_{th}$ alors l'augmentation 3D est considérée comme étant affichée et visible par l'opérateur. Dans ce cas, l'affichage de l'augmentation 3D est activé et l'opacité de cette dernière est fixée à une valeur standard α_{std} permettant à l'opérateur de visualiser à la fois l'augmentation 3D ainsi que la surface de la pièce réelle à laquelle cette augmentation est superposée.

En conclusion, cette stratégie privilégie le maintien de bonnes performances devant la prise en compte des préférences de l'opérateur.

Deuxième stratégie d'adaptation : Gestion indépendantes des performances et des préférences

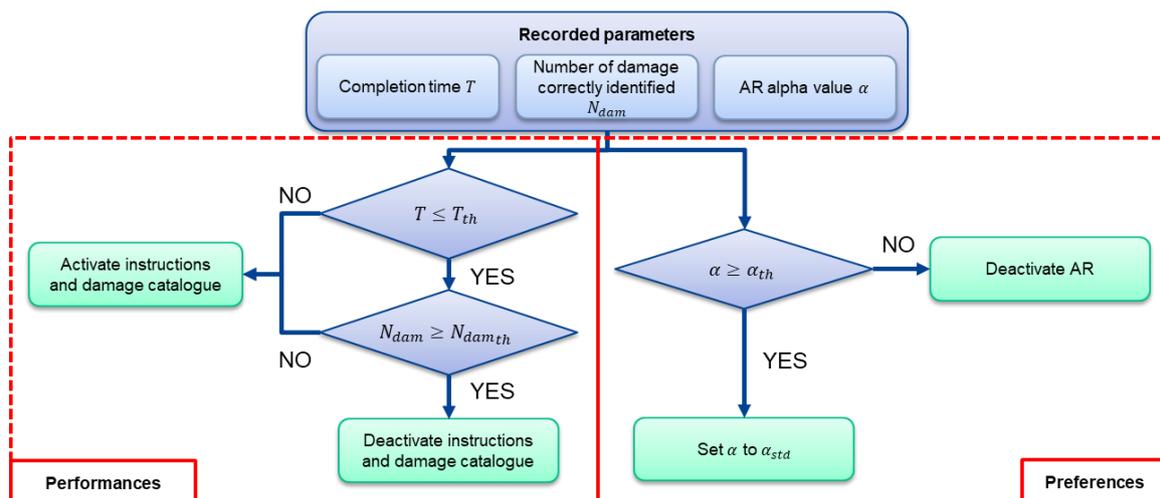


Figure 40 : Stratégie d'adaptation B (flexibilité renforcée)

La deuxième stratégie d'adaptation (B) présentée en Figure 40 évalue les performances et les préférences de l'opérateur de façon indépendante. Dans cette configuration, l'analyse des préférences n'est plus conditionnée par les performances obtenues par l'opérateur. Ainsi, la visibilité des augmentations 3D est ici systématiquement ajustée selon les préférences de visualisation de l'opérateur. Du côté de l'évaluation des performances, les règles régissant l'affichage des instructions textuelles et du catalogue de dommages restent inchangées.

En procédant de cette manière, la flexibilité de la stratégie d'adaptation se voit renforcée puisqu'une adaptation, à minima partielle, des informations présentées s'opèrent de façon systématique.

4.4.3. Protocole expérimental

Cette étude se compose de trois phases (voir Figure 41) : pré-expérimentale, expérimentale et post-expérimentale. La phase pré-expérimentale se déroule avant l'immersion dans l'environnement de réalité augmentée. Lors de cette phase, le protocole expérimental et les objectifs de l'étude sont présentés au participant. Le participant s'équipe ensuite du visiocasque afin de pouvoir passer à la deuxième phase. Cette nouvelle phase commence avec un court tutoriel visant à appréhender les différentes interactions possibles au sein de l'environnement de réalité augmentée. L'objectif de cette étape d'apprentissage est de minimiser l'effet de nouveauté lié à la découverte de la technologie de réalité augmentée (aucun participant n'avait d'expérience avec ce type de casque). Pour la suite de cette phase expérimentale, il est demandé à chaque participant de réaliser trois sessions d'inspection. La répétition de ces sessions vise à contrôler la répétabilité des résultats obtenus (c.-à-d. vérifier que le participant identifie bien le même nombre de dommages d'une session à l'autre). Cette répétition permet également la mise en œuvre d'une adaptation hors ligne, dont la mise à jour des contenus est réalisée entre les sessions. Les trois sessions sont réalisées de façon consécutive pour une durée totale prévue pour rester aux alentours de trente minutes d'immersion en réalité augmentée. À l'issue de la troisième session le participant retire le casque et complète le questionnaire NASA-TLX. Une mesure du rythme cardiaque est également réalisée en équipant les participants d'un bracelet Empatica E4 au début de l'expérimentation. La mesure de cette grandeur est lancée au début de la première session (à l'issue du tutoriel) et est arrêtée à la fin de la troisième session.

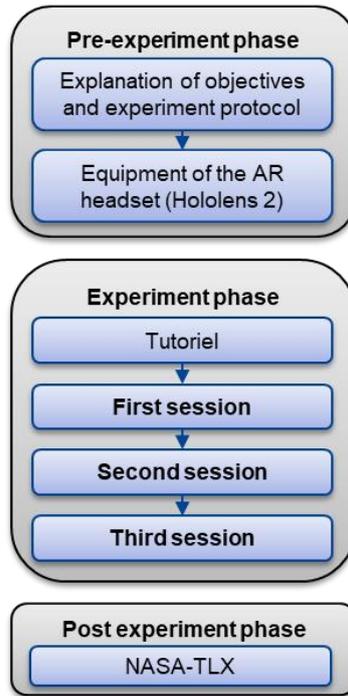


Figure 41 : Protocole expérimental

4.4.4. Résultats

Au total, trente participants ont pris part à cette expérimentation. Ces participants étaient répartis en plusieurs groupes et sous-groupes suivant la distribution présentée par le Tableau 12.

Group	G_1	G_2	
Sub-group		G_{2a}	G_{2b}
Number of participants	12	9	9

Tableau 12 : Distribution des participants dans les différents groupes et sous-groupes

Rappelons que les participants du groupe G_1 sont les experts ayant permis d'établir des valeurs de références pour les performances obtenues sur la tâche d'inspection assistée par réalité augmentée considérée dans le cadre de cette étude. Les participants de ce groupe ont donc expérimenté une assistance en réalité augmentée standard, sans aucune forme d'adaptation d'une session à l'autre. Les participants du groupe G_2 sont des débutants, n'ayant aucune connaissance de la tâche d'inspection qui leur est assignée lors de cette expérimentation.

Contrairement aux participants du groupe G_1 , les participants de G_2 ont tous eu accès à une expérience d'assistance en réalité augmentée capable de s'adapter d'une session à l'autre, en fonction de leurs performances et de leurs préférences. Au sein de ce deuxième groupe, nous distinguons deux-sous groupes G_{2a} et G_{2b} ayant expérimenté l'une ou l'autre des deux stratégies d'adaptation présentées dans la section 4.4.2. Ainsi, le sous-groupe G_{2a} a expérimenté la stratégie d'adaptation A (Figure 39) tandis que le sous-groupe G_{2b} a expérimentée la stratégie d'adaptation B (Figure 40).

Charge cognitive

Les résultats du questionnaire NASA-TLX, rempli par chacun des participants à l'issue de la troisième et dernière session d'inspection, fournit des premiers éléments de réponse à la question Q2* (cf. section 4.4.1). Afin de vérifier si les résultats obtenus sont statistiquement significatifs, nous avons effectué une Analyse de la variance à un facteur (ANOVA). Le seuil critique est fixé à 0.05, ce qui signifie qu'une différence de distribution entre deux groupes est considérée comme statistiquement significative si la valeur-p est telle que $p < 0.05$.

Ainsi, les résultats obtenus par le biais de ce questionnaire montrent une différence statistiquement significative ($p=0.012$) entre la charge cognitive globale des participants de G_{2a} et celle des participants de G_{2b} . Le score global moyen de G_{2a} est de 46.5 contre 26.3 pour G_{2b} . Ces résultats semblent indiquer que la stratégie d'adaptation B, privilégiant la flexibilité de l'adaptation et la prise en compte des préférences, permet une diminution significative de la charge cognitive globale par rapport à une stratégie moins flexible (prise compte des préférences non systématique). Cela suggère donc également que les instructions délivrées par l'application de la stratégie B ont été davantage en mesure de répondre aux besoins d'assistance des participants.

En étudiant les résultats pour chacune des six composantes évaluées dans le NASA-TLX, nous pouvons également observer une amélioration significative ($p=0.041$) de la composante liée à la performance perçue par les participants du sous-groupe G_{2b} par rapport au sous-groupe G_{2a} . Bien que nous observions également une diminution des cinq autres composantes pour le G_{2b} par rapport à G_{2a} , ces résultats ne s'avèrent finalement pas statistiquement significatifs au sens de l'ANOVA (car $p > 0.05$).

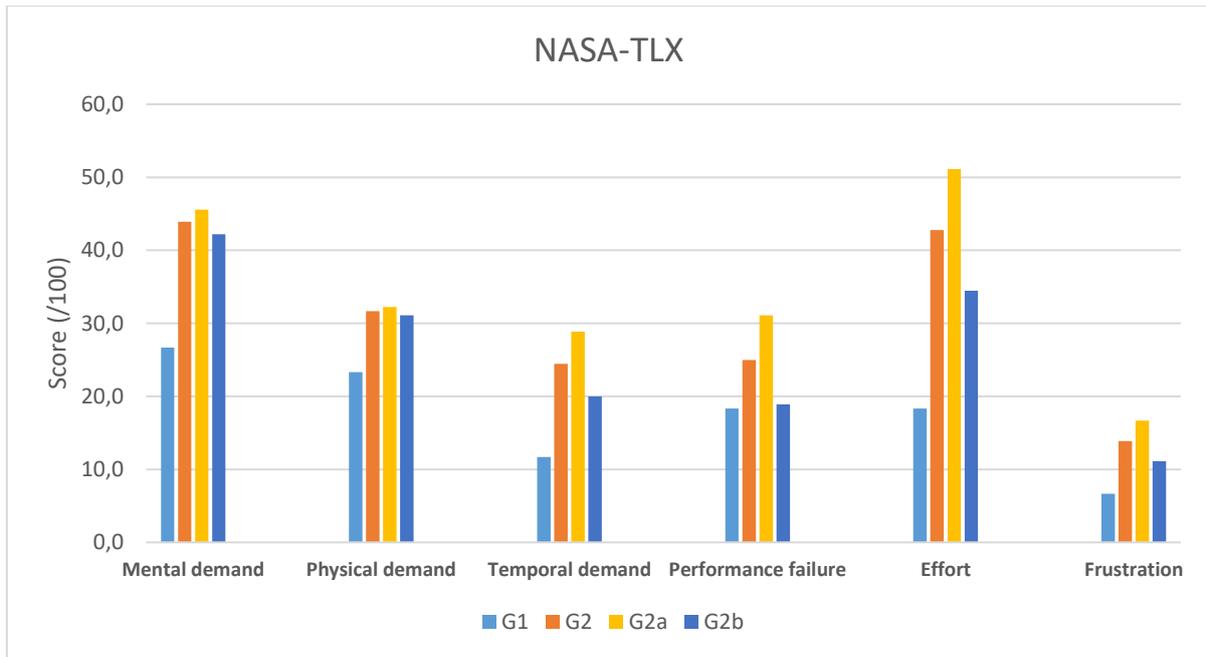


Figure 42 : Résultats du NASA-TLX obtenus pour chacun des groupes et sous-groupes

Mesures physiologiques

Les données issues de la mesure du rythme cardiaque des participants indiquent une élévation de celui-ci lors de l'exécution de la tâche d'inspection pour tous les groupes. Toutefois, l'analyse de cette élévation indique qu'aucune différence observée entre les groupes et les sous-groupes n'est statistiquement significative, que ce soit entre G_{2a} et G_{2b} ($p=0.189$) ou entre G_1 et G_2 ($p=0.828$).

Performances

L'analyse des performances obtenues par les deux sous-groupes ne montre pas de différence significative ($p=0.33$) entre ces derniers en termes de temps d'exécution. Cependant l'analyse de la qualité (c.-à-d. nombre de dommages identifiés) met en avant une amélioration de celle-ci pour les participants de G_{2b} . En effet, seul un participant, sur les neuf de ce sous-groupe, n'est pas parvenu à identifier les six dommages critiques présents sur la pièce alors qu'ils étaient trois (toujours sur un total de neuf) dans ce cas pour le sous-groupe G_{2a} .

Éléments de réponses aux questions de recherche

En conclusion, la diminution de la charge cognitive observée chez les participants bénéficiant de l'adaptation la plus flexible par rapport à ceux bénéficiant de l'adaptation moins flexible soutient notre hypothèse H1 : l'absence de différence significative du temps de complétion couplée à l'amélioration de la qualité observée chez les participants ayant bénéficié de l'adaptation la plus flexible soutiennent notre hypothèse H2 : Une plus grande flexibilité du mécanisme d'adaptation permet, à minima, de maintenir le même niveau de performances de l'opérateur comparée à une flexibilité moins importante. À la lumière de ces résultats, il apparaît donc que la flexibilité de l'adaptation fournie par le système d'assistance adaptative a un impact bénéfique sur la charge cognitive et la qualité tout en étant sans conséquence sur le temps d'exécution (Q2*). Cela implique donc, par la même occasion, que l'impact du système d'assistance adaptative sur la charge cognitive et la qualité diffère selon la stratégie d'adaptation mise en œuvre (Q2).

De la même manière, la diminution de la charge cognitive ainsi que l'amélioration de la qualité et l'invariance du temps d'exécution pour les participants dont la prise en compte des préférences était systématique soutiennent notre hypothèse H3.

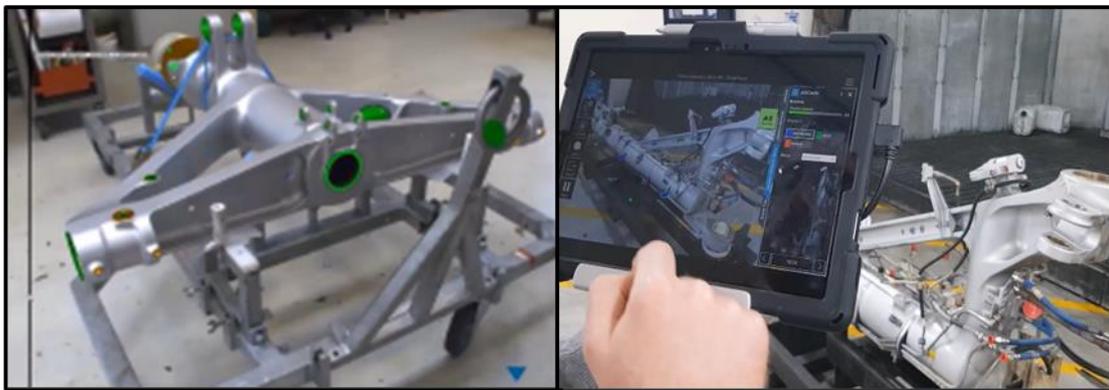
Autres observations

Nous avons noté des différences de stratégies de travail entre les utilisateurs. La stratégie la plus répandue consiste à localiser un dommage (en plaçant une étiquette) puis à l'annoter tout de suite en précisant son type (corrosion ou rayure). Certains utilisateurs préfèrent localiser tous les dommages avant de tous les annoter dans un second temps. Ces observations montrent bien qu'à niveau de compétence équivalent (les participants du groupe G_2 étaient tous débutants) plusieurs méthodes de travail peuvent coexister entre différents individus. Par ailleurs, certains participants ont également modifié leur stratégie de travail d'une session à l'autre en cherchant à optimiser leur efficacité.

4.5. Déclinaison de la méthodologie sur d'autres cas d'usage

4.5.1. Introduction

En plus des systèmes développés et présentés dans les sections précédentes, d'autres cas d'usage industriels ont pu bénéficier des concepts développés dans la méthodologie pour concevoir des systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée. Avant le développement de l'assistance adaptative sur ces deux cas d'usages, ces derniers étaient déjà assistés par la réalité augmentée mais de façon non adaptative. Ces cas d'usage (Figure 43) sont le masquage avant peinture et l'inspection préliminaire des trains d'atterrissage A330.



Masquage peinture

Inspection préliminaire

Figure 43 : Cas d'usage bénéficiant de l'assistance adaptative

4.5.2. Contexte industriel

Le développement de l'assistance adaptative chez Safran Landing Systems s'inscrit dans la continuité d'une activité de réalité augmentée ayant démarré en 2017. Depuis le début de cette activité, l'utilisation de la réalité augmentée comme outil d'assistance aux opérations de maintenance a été développée sur de nombreux cas d'usages. Certains projets sont restés au stade de démonstrateurs tandis que d'autres ont été industrialisés en passant par une phase de pilote. Parmi ces projets huit ont dépassé le stade de démonstrateur. Pour ces cas d'usage les opérateurs utilisent donc le système de réalité augmentée de façon systématique pour mener à bien les opérations de maintenance qui leurs sont assignées. Parmi ces huit cas d'usages, deux ont été modifiés en y intégrant l'adaptation de l'assistance en fonction des caractéristiques des

opérateurs. Ces huit cas d'usages traitent de quatre types d'opérations. Ainsi, deux cas d'usages concernent des opérations d'assemblage, deux autres concernent des opérations de masquage peinture, trois concernent des opérations d'inspection préliminaire et le dernier cas d'usage concerne une opération d'inspection finale.

Inspection préliminaire

L'opération d'inspection préliminaire est la première étape du flux de maintenance (rappel Figure 16). Cette opération est réalisée à la réception du centre de maintenance (MRO) afin de s'assurer et d'attester de la bonne réception de l'ensemble et de l'état général des éléments et équipements envoyés par le client (la compagnie aérienne détenant l'avion auquel est rattaché l'équipement aéronautique). Les opérations d'inspection préliminaires sont composées de différentes tâches. Lors de ce genre d'opérations l'opérateur doit relever des numéros de série (S/N pour Serial Number) et des références de pièces (P/N pour Part Number) gravés sur des plaquettes d'identification ou inscrits à la surface des pièces. L'opérateur doit également s'assurer de la présence de l'ensemble des pièces et éléments constituant l'équipement et relever les anomalies les plus évidentes. Le système d'assistance RA utilise des annotations 3D (sous forme d'étiquettes) afin de présenter la localisation des P/N et S/N à relever. Les zones à contrôler sont indiquées par des flèches 3D tandis que les éléments dont la présence doit être vérifiée sont représentés par leur modèle 3D. Pour chaque point de vue à inspecter, une photo de l'état conforme de l'équipement depuis le point de vue est présentée à l'opérateur. Enfin, des pictogrammes et des informations textuelles rappellent les informations à relever (P/N, S/N, photo à prendre) pour chaque étape de la procédure d'assistance.

Masquage peinture

Lors du processus de maintenance décennale des trains d'atterrissage, les couches de traitement de surface (peinture, chrome) sont retirées des pièces concernées afin de pouvoir inspecter leur surface. C'est pourquoi avant de remettre en service les équipements, il est nécessaire de restaurer ces traitements de surface. Toutefois, les surfaces fonctionnelles des pièces (alésages, filetages, etc.) ne doivent pas être traitées afin de ne pas altérer le fonctionnement de l'équipement. Il est donc nécessaire de masquer ces zones afin de ne pas appliquer le traitement prévu pour le reste de la pièce. C'est ici qu'intervient l'opération de masquage peinture, qui consiste à appliquer / installer des masques sur les zones à exclure du traitement. Pour les

opérations de masquage peinture, le système d'assistance RA présente donc les modèles 3D des masques en superposition de la pièce à peindre afin que l'opérateur puisse positionner les masques correctement. De cette façon, les opérateurs peuvent facilement localiser l'emplacement des masques sur la pièce et ajuster leur orientation si nécessaire.

Assemblage

Lors des opérations d'assemblage, les opérateurs sont amenés à identifier et localiser à la fois les éléments à assembler et les outils à utiliser pour effectuer cet assemblage. Afin de faciliter ces tâches, le système d'assistance RA indique les références de ces éléments à l'aide d'annotations 3D attachées au modèle 3D de ces derniers. Ces modèles 3D sont affichés en superposition du composant servant de base à l'assemblage en cours. Les dénominations des outils à utiliser lors de chaque étape de l'assemblage sont affichées sous forme de texte.

Inspection finale

L'inspection finale peut être vue comme l'opération miroir de l'inspection préliminaire. Cette opération permet de vérifier la conformité de l'équipement (Présence et état de tous les éléments de l'assemblage) avant de renvoyer celui-ci chez le client. Le système d'assistance RA présente les modèles 3D des pièces composant l'équipement afin de vérifier que leur localisation et leur orientation sont correctes. Des photos types sont également présentées pour contrôler certains éléments plus spécifiques comme les mastiques censés attester de la conformité du serrage des flexibles.

Le Tableau 13 récapitule, pour chaque type d'opération, les différentes informations transmises par le système d'assistance RA ainsi que les modes d'informations utilisés pour cette transmission.

Opération	Informations présentées	Mode d'informations utilisés
Masquage peinture	Zones à masquer	Modèles 3D
Inspection préliminaire	Zones à inspecter Eléments à inspecter Références à relever (P/N et S/N)	Flèches 3D Modèles 3D Annotations 3D Photos Pictogrammes 2D Texte
Assemblage	Eléments à assembler Position des éléments dans l'assemblage	Modèles 3D Annotations 3D Texte
Inspection finale	Eléments à inspecter	Modèles 3D Photos

Tableau 13 : Informations transmises à l'opérateur par le système RA

Pour l'opération de masquage peinture bénéficiant d'une assistance adaptative, le système bascule entre deux modes d'affichages en fonction des performances de l'opérateur. Ainsi, si le temps d'exécution de l'opération en cours passe sous un certain seuil, le système basculera l'affichage des zones à masquer en mode 3D pour la prochaine session de masquage. En mode 3D l'opérateur n'a pas besoin de filmer la pièce à masquer pour faire apparaître les informations. Dans ce mode de visualisation, l'opérateur manipule la maquette 3D (déplacement, rotation, zoom) comme il le souhaite afin d'observer les masques à poser. Ainsi, l'opérateur n'a plus besoin de déplacer la caméra ou de naviguer autour de la pièce pour pouvoir observer l'ensemble des informations dont il a besoin. L'opérateur peut toutefois décider de rebasculer vers le mode de visualisation initial intégrant les informations en RA.

Pour l'opération d'inspection préliminaire, si le temps d'exécution de l'étape en cours passe en dessous d'un certain seuil, le système d'assistance adaptative désactive les indications 3D à l'exception des modèles 3D, limitant ainsi la redondance des informations. En effet, dans cette configuration, seules les photo types permettent de localiser les zones à inspecter.

Les composants de ces deux systèmes d'assistance adaptative sont récapitulés dans le Tableau 14.

Opération	Éléments ajustés	Indicateurs	Stratégie d'adaptation
Masquage peinture	- Modes d'interaction - Modes d'information	- Performances (temps d'exécution) - Préférences (sélection manuelle mode d'affichage)	Si le temps d'exécution passe sous un certain seuil, le système bascule l'affichage des masques en mode 3D. L'opérateur peut aussi choisir manuellement le mode d'affichage si celui proposé ne convient pas
Inspection préliminaire	- Mode d'informations - Redondance des informations	- Performances (temps)	Si le temps d'exécution passe sous un certain seuil, les indications 3D sont désactivées pour l'étape en cours.

Tableau 14 : Composants des systèmes d'assistance adaptative utilisés pour le masquage peinture et l'inspection préliminaire

4.5.3. Bilan des activités d'assistance en réalité augmentée

Sur les huit cas d'usage utilisant l'assistance en réalité augmentée on constate une part importante d'arrêts (5/8 cas). Dans la plupart de ces cas, l'arrêt survient à la fin ou peu après la phase pilote. La raison principale avancée pour expliquer ces arrêts est la montée en compétences des opérateurs. En effet, dans un premier temps, l'assistance en réalité augmentée est bienvenue et permet d'observer des gains dans la qualité des opérations exécutées avant, dans un second temps, de devenir plus contraignante lorsque les opérateurs ont suffisamment assimilé et mémorisé les informations présentées par le système d'assistance. Les opérateurs expérimentés se tournent alors davantage vers des supports plus abstraits tels que les plans de contrôle ou les instructions au format PDF. Contrairement aux cas utilisant une assistance non-adaptative qui ne dépassent pas une année d'activité, les deux ARAAS développés pour le masquage peinture et l'inspection préliminaire sont en activité depuis respectivement 20 et 18 mois. Le Tableau 15 synthétise les activités de réalité augmentée mises en place dans les différents ateliers de Safran Landing Systems.

Cas d'usage	Durée d'activité (en mois)	Statut	Solution adaptative (ARAAS)
Masquage peinture	20	En cours	Oui
Masquage peinture 2	4	En cours	Non
Inspection préliminaire 1	12	Arrêté	Non
Inspection préliminaire 2	10	Arrêté	Non
Inspection préliminaire 3	18	En cours	Oui
Assemblage	8	Arrêté	Non
Assemblage 2	6	Arrêté	Non
Inspection finale	6	Arrêté	Non

Tableau 15 : Activités de réalité augmentée chez Safran Landing Systems

4.5.4. Synthèse

Le cas d'usage industriel ainsi que les deux dispositifs expérimentaux décrits dans la section 4 ont été conçus en appliquant la méthodologie développée dans la section 3. Il est donc important de noter que les résultats de ces expérimentations mettent en lumière l'apport de systèmes d'assistance adaptative ayant été produits par la mise en œuvre de cette méthodologie. En effet, ces résultats montrent déjà que la méthodologie proposée dans ce manuscrit permet de concevoir des systèmes capables de réduire le temps d'exécution (voir section 4.2.4) et d'améliorer la qualité (voir section 4.3.4). Bien que les résultats présentés dans la section 4.3.4 soient en défaveur d'un apport du système d'assistance adaptative en comparaison d'une solution de réalité augmentée non-adaptative, ces résultats indiquent également que l'adaptation n'en diminue pas l'utilisabilité du système. La démarche mise en place dans l'expérimentation détaillée dans la section 4.4 s'appuie sur la méthodologie de conception de ARAAS pour explorer différentes stratégies d'adaptation dans le but d'améliorer encore les bénéfices apportés par ce genre de systèmes. Enfin la longévité des deux systèmes déployés sur les opérations de masquage avant peinture et d'inspection préliminaire suggère que l'adaptation des instructions permet de maintenir l'engagement des opérateurs sur le long terme.

Conclusion

Synthèse des travaux

La recherche concernant l'utilisation de la réalité augmentée comme outils d'assistance aux opérations de maintenance révèle certaines limites de ce genre d'applications pouvant provenir du manque d'adaptation des contenus proposés en fonction des besoins et des préférences d'assistance de chacun. Les études proposant des systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée s'intéressent encore peu à l'apport de cette adaptation en comparaison de systèmes d'assistance de réalité augmentée non-adaptatifs. De plus les systèmes proposés dans la littérature restent bien souvent cantonnés à un type d'application ou à un cas d'usage spécifiques. Les travaux présentés dans ce manuscrit apportent des réponses à ces problématiques au travers du développement d'une méthodologie permettant d'identifier les caractéristiques des opérations de maintenance et des opérateurs à prendre en compte pour la conception de système d'assistance adaptative en réalité augmentée. La mise en œuvre de cette méthodologie à la fois sur des dispositifs expérimentaux et sur des cas d'usage industriels a permis d'évaluer l'impact de tels systèmes sur les performances et la charge cognitive des opérateurs. L'étude de l'activité des systèmes d'assistance de réalité augmentée mis en œuvre chez Safran Landing Systems, met en lumière le maintien de l'engagement des opérateurs sur le long terme apporté par l'adaptation des contenus proposés par les systèmes d'assistance adaptative développés.

En résumé, les contributions apportées par les travaux menés dans le cadre de la présente thèse sont les suivantes :

- a) L'identification des composants nécessaires à la mise en place d'une assistance adaptative en réalité augmentée pour les opérations de maintenance. Cette identification est détaillée dans la première couche de la méthodologie développée. Cette couche de modélisation donne une structure au principe de l'assistance adaptative en réalité augmentée ayant pour vocation à être généralisable à l'ensemble des opérations de maintenance des équipements aéronautiques.

- b) L'identification des critères à prendre en compte pour la conception de système d'assistance adaptative en réalité augmentée. La démarche proposée dans la deuxième couche de la méthodologie développée propose des outils permettant de guider la conception de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée.
- c) La mise en évidence de l'impact de l'assistance adaptative sur les performances et la charge cognitive des opérateurs. L'impact de l'assistance adaptative sur les performances des opérateurs s'avère positif, notamment concernant les aspects liés à la qualité. Les résultats obtenus lors de nos recherches montrent cependant que l'adaptation des contenus peut entraîner une élévation de la charge cognitive de l'opérateur sans pour autant que ses performances soient directement affectées.
- d) La mise en évidence de l'influence du choix de la stratégie d'adaptation sur l'apport de l'assistance adaptative en RA. Les choix de conception faits dans la gestion des contenus en fonction des performances et des préférences évaluées chez les opérateurs peuvent permettre d'améliorer la gestion de la charge cognitive.
- e) La mise en évidence de l'apport lié à la prise en compte des préférences de visualisation des opérateurs. La prise en compte systématique de ces préférences de visualisation a permis une diminution de la charge cognitive ainsi qu'une amélioration de la qualité sur une opération d'inspection.
- f) La mise en évidence du maintien à long terme de l'engagement des opérateurs sur le système d'assistance adaptative en RA en comparaison de systèmes non-adaptatifs. Les deux cas d'assistances adaptatives développées sont toujours en activité depuis leur mise en place, contrairement aux solutions non-adaptatives dont l'activité est bien souvent arrêtée durant leur première année d'exploitation, faute de support pertinent pour les profils expérimentés.

Perspectives

En plus des réponses aux questions de recherche formulées, les résultats apportés par les travaux présentés dans ce manuscrit permettent d'envisager de nouvelles pistes de recherche à explorer pour mieux comprendre l'influence des choix de conceptions des systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée sur les performances, l'engagement et la charge cognitive des opérateurs. Plusieurs hypothèses peuvent notamment être formulées pour tenter d'expliquer l'élévation de la charge cognitive observée chez les opérateurs ayant bénéficié d'une assistance adaptative en comparaison de ceux ayant eu recours à une assistance non adaptative. Tout d'abord, il est possible que les résultats ne soient pas suffisamment contrastés car la tâche est peut-être trop simple pour nécessiter une adaptation. Une évaluation approfondie de la complexité des opérations assistées par la réalité augmentée et une étude dédiée à la mesure de l'impact de l'assistance adaptative en fonction de cette complexité pourraient ainsi permettre de tester cette hypothèse. Dans le cas où cette influence serait avérée et significative, l'évaluation détaillée de la complexité des opérations de maintenance pourrait être ajoutée à la méthodologie. Une seconde hypothèse fait intervenir la notion de visibilité de l'adaptation aux yeux de l'opérateurs. En effet, l'adaptation mise en œuvre dans notre étude (section 0) intervenait sur une période relativement courte (moins de 30 min d'activité). Ainsi, bien que les modifications soient effectuées entre deux sessions travail, l'enchaînement rapide de ces deux sessions permettent à l'opérateur de percevoir les modifications appliquées à la procédure d'assistance. Cette perception des modifications pourrait créer une certaine incompréhension chez les opérateurs. Il serait donc pertinent de réaliser ce genre d'étude avec des sessions plus espacées, afin de rendre les modifications moins perceptibles.

La méthodologie développée étant destinée à l'ensemble des typologies d'opérations de maintenance rencontrées dans l'industrie aéronautique, l'exploration d'autres cas d'usages que ceux présentés dans ce manuscrit mériterait d'être poursuivie. Cela permettrait de confirmer la généralisation de la méthodologie ou, dans le cas contraire, d'identifier les points d'améliorations possibles pour permettre sa diffusion et son utilisation à grande échelle.

Par ailleurs, la modification des contenus par le système est rendue possible par la création de nombreuses variantes des procédures d'assistance pour une opération donnée. Cela représente un volume de contenus à créer plus important que pour une solution d'assistance non-adaptative. Il y a donc un vrai enjeu dans la création de contenus d'assistance en réalité augmentée et la façon de gérer ce dernier. Cette augmentation de la quantité de contenus créés par procédure d'assistance induit également des contraintes plus lourdes dans la maintenance et la mise à jour de ces contenus sur le long terme. L'étude de ces aspects mériteraient donc d'être approfondie afin d'assurer la mise en place pérenne de de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée dans l'industrie.

Valorisation scientifique des travaux

Les travaux du présentés dans ce manuscrit ont fait l’objet des publications et communications scientifiques suivantes :

- Un article intitulé “Skill level monitoring applied to AR assisted maintenance” présenté dans le cadre de la conférence internationale Euro XR 2021 et publié dans les proceedings de cette dernière.
- Un article intitulé “ Exploring Adaptive Augmented Reality Maintenance Assistance : A comparative study” présenté dans le cadre de la conférence internationale ICVRIS 2022 (International Conference on Virtual Reality and Intelligent Systems) et publié dans les proceedings de cette dernière.
- Un article intitulé “Framework for Augmented Reality-based Adaptive Assistance applied to Maintenance Operations” soumis pour une publication dans le journal Computers in Industry.

Bibliographie

- [1] P. Ross et K. Maynard, «Towards a 4th industrial revolution,» *Intelligent Buildings International*, vol. 13, n° 13, pp. 159-161, 2021.
- [2] H. Kagermann, W. Wahlster et J. Helbig, «Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0,» 2013.
- [3] P. Milgram et F. Kishino, «A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays,» *IEICE Transactions on Information Systems*, vol. 77, n° 112, 1994.
- [4] P. A. Rauschnabel, R. Felix, C. Hinsch, H. Shahab et F. Alt, «What is XR? Towards a Framework for Augmented and Virtual Reality,» *Computers in Human Behavior*, vol. 133, 2022.
- [5] I. E. Sutherland, «A head-mounted three dimensional display,» chez *Fall Joint Computer Conference*, Salt Lake City, 1968.
- [6] R. T. Azuma, «A Survey of Augmented Reality,» *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, pp. 355-385, 1997.
- [7] Google, «Enterprise Edition - Glass,» Google, [En ligne]. Available: <https://www.google.com/glass/start/>. [Accès le March 2023].
- [8] Snap Inc., «Share the moment | Snapchat,» Snap Inc., [En ligne]. Available: [snapchat.com/fr-FR](https://www.snapchat.com/fr-FR). [Accès le March 2023].
- [9] «Pokemon GO,» [En ligne]. Available: <https://www.pokemon.com/fr/app/pokemon-go/>. [Accès le Septembre 2022].

- [10] R. Azuma, Y. Baillot, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier et B. MacIntyre, «Recent Advances in Augmented Reality,» *IEEE Computer Graphics and Applications*, pp. 34-47, 2001.
- [11] Microsoft, «Hololens 2 - Présentation, Fonctions et Spécifications | Microsoft Hololens,» [En ligne]. Available: <https://www.microsoft.com/fr-fr/hololens/hardware>. [Accès le 20 09 2022].
- [12] Dassault Systèmes, «Shape the world we live in | CATIA - Dassault Systèmes,» [En ligne]. Available: <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/>. [Accès le Décembre 2022].
- [13] PTC, «Creo : Le logiciel de CAO à la pointe de la conception | PTC,» [En ligne]. Available: <https://www.ptc.com/fr/products/creo>. [Accès le Décembre 2022].
- [14] Autodesk, «Logiciel 3ds Max,» [En ligne]. Available: <https://www.autodesk.fr/products/3ds-max/overview>. [Accès le Décembre 2022].
- [15] «blender.org - Home of the Blender project - Free and Open 3D Creation Software,» [En ligne]. Available: <https://www.blender.org/>. [Accès le Décembre 2022].
- [16] Dassault Systèmes, «CATIA Composer,» [En ligne]. Available: <https://www.3ds.com/fr/produits-et-services/catia/produits/catia-composer/>. [Accès le Décembre 2022].
- [17] PiXYZ Software, «PixyzStudio - The ultimate 3D preparation software | Pixyz Software,» [En ligne]. Available: <https://www.pixyz-software.com/studio/>. [Accès le Décembre 2022].
- [18] Unity Technologies, «Plateforme de développement en temps réel Unity | Moteur pour 3D, 2D, RV et RA,» [En ligne]. Available: <https://unity.com/fr>. [Accès le Décembre 2022].

- [19] Epic Games, «Le plus puissant des outils de création 3D en temps réel - Unreal Engine,» [En ligne]. Available: <https://www.unrealengine.com/fr>. [Accès le Décembre 2022].
- [20] PTC, «Vuforia Studio et la réalité augmentée pour l'entreprise industrielle | PTC,» [En ligne]. Available: <https://www.ptc.com/fr/products/vuforia/vuforia-studio>. [Accès le Décembre 2022].
- [21] Diota, «DiotaEditor - Diota,» [En ligne]. Available: <https://www.diota.com/fr/solutions-produits/nos-produits/diotaeditor/>. [Accès le Décembre 2022].
- [22] R. Palmarini, J. A. Erkoyuncu, R. Roy et H. Torabmostaedi, «A systematic review of augmented reality applications in maintenance,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 49, pp. 215-228, 2018.
- [23] H. Regenbrecht et G. Baratoff, «Augmented Reality Projects in Automotive and Aerospace Industries,» *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005.
- [24] A. Nee, S. K. Ong, G. Chryssolouris et D. Mourtzis, «Augmented reality applications in design and manufacturing,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 61, pp. 657-679, 2012.
- [25] L. F. de Souza Cardoso, F. C. M. Q. Mariano et E. R. Zorzal, «A survey of industrial augmented reality,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, 2020.
- [26] M. Eswaran, A. K. Gulivindala, A. K. Inkulu et M. R. Bahubalendruni, «Augmented reality-based guidance in product assembly and maintenance/repair perspective: A state of the art review on challenges and opportunities,» *Expert Systems With Applications*, vol. 213, 2022.
- [27] L. Damiani, M. Demartini, G. Guizzi, R. Revetria et F. Tonelli, «Augmented and virtual reality applications in industrial systems: A qualitative review towards the industry 4.0 era,» chez *FFAC PapersOnLine*, 2018.

- [28] J. S. Devagiri, S. Paheding, Q. Niyaz, X. Yang et S. Smith, «Augmented Reality and Artificial Intelligence in industry: Trends, tools, and future challenges,» *Expert Systems With Applications*, vol. 207, 2022.
- [29] P. Fraga-Lamas, T. M. Fernandez-Caramés, O. Blanco-Novoa et M. A. Vilar-Montesinos, «A Review on Industrial Augmented Reality Systems for the Industry 4.0 Shipyard,» *Human-Centered Smart Systems and Technologies*, 2017.
- [30] I. F. del Amo, J. A. Erkoyuncu, R. Roy, R. Palmarini et D. Onoufriou, «A systematic review of Augmented Reality content-related techniques for knowledge tranfert in maintenance applications,» *Computers in Industry*, n° %1103, pp. 47-71, 2018.
- [31] P. Hold, F. Ranz, W. Sihn et V. Hummel, «Planning Operator Support in Cyber-Physical Assembly Systems,» *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, pp. 60-65, 2016.
- [32] L. Hou et X. Wang, «A study on the benefits of augmented reality in retaining working memory in assembly tasks: A focus on differences in gender,» *Automation in Construction*, vol. 32, pp. 38-45, 2013.
- [33] F.-K. Chiang, X. Shang et L. Qiao, «Augmented reality in vocational training: A systematic review of research and applications,» *Computers in Human Behavior*, vol. 129, 2022.
- [34] J. Johansson, G. Eriksson, P. Johansson, L. Malmköld, Å. Fast-Berglund et L. Moestam, «Assessment Based Information Needs in Manual Assembly,» *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research(ICPR 2017)*, pp. 366-371, 2017.
- [35] M. Moghaddam, N. C. Wilson, A. S. Modestino, K. Jona et S. C. Masella, «Exploring augmented reality for worker assistance versus training,» *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, 2021.
- [36] F. Quint, F. Loch et P. Bertram, «The Challenge of Introducing AR in Industry - Results of a Participative Process Involving Maintenance Engineers,» chez *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, Modena, 2017.

- [37] Q. Loizeau, F. Danglade, F. Ababsa et F. Mérienne, «Evaluating Added Value of Augmented Reality to Assist Aeronautical Maintenance Workers -», chez *16th Euro VR International Conference*, Tallinn, 2019.
- [38] D. Ariansyah, J. A. Erkoyuncu, I. Eimontaite, T. Johnson, A.-M. Oostveen, S. Fletcher et S. Sharples, «A head mounted augmented reality design practice for maintenance assembly: Toward meeting perceptual and cognitive needs of AR users,» *Applied Ergonomics*, vol. 98, 2022.
- [39] C. D. Wickens, «Multiple resources and performance prediction,» *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 3, n° %12, pp. 159-177, 2002.
- [40] H. Kim et J. L. Gabbard, «Assessing Distraction Potential of Augmented Reality Head-Up Displays for Vehicle Drivers,» *Human Factors*, vol. 64, n° %15, pp. 852-865, 2019.
- [41] S. Wiedenmaier, O. Oehme, L. Schmidt et H. Luczak, «Augmented Reality (AR) for Assembly Processes Design and Experimental Evaluation,» *International Journal of Human-Computer Interaction*, vol. 16, n° %13, pp. 497-514, 2003.
- [42] R. Radkowski, J. Herrema et J. Oliver, «Augmented Reality-Based Manual Assembly Support With Visual Features for Different Degrees of Difficulty,» *Human-Computer Interaction*, vol. 31, pp. 337-349, 2015.
- [43] M. Drouot, N. Le Bigot, E. Bricard, J.-L. de Bougrenet et V. Nourrit, «Augmented reality on industrial assembly line: Impact on effectiveness and mental workload,» *Applied Ergonomics*, vol. 103, 2022.
- [44] J. Zhu, S. K. Ong et A. Y. C. Nee, «An authorable context-aware augmented reality system to assist the maintenance technicians,» *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 66, pp. 1699-1714, 2013.
- [45] R. Oppermann, R. Rashev et Kinshuk, «Adaptability and Adaptivity in Learning Systems,» *Knowledge transfer*, 1997.

- [46] T. P. Wright, «Factors Affecting the Cost of Airplanes,» *Journal of the aeronautical sciences*, vol. 3, pp. 122-128, 1936.
- [47] C. H. Glock, E. H. Grosse, M. Y. Jaber et T. L. Smunt, «Applications of learning curves in production and operations management: A systematic literature review,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 131, pp. 422-441, 2019.
- [48] G. Apostolopoulos, D. Andronas, N. Fourtakas et S. Makris, «Operator training framework for hybrid environments: An Augmented Reality module using machine learning object recognition,» chez *Conference on Assembly Technology and Systems*, 2022.
- [49] J. L. Plass, B. D. Homer, S. Pawar, C. Brenner et A. P. MacNamara, «The effect of adaptive difficulty adjustment on the effectiveness of a game to develop executive function skills for learners of different ages,» *Cognitive Development*, n° 149, pp. 59-67, 2019.
- [50] H. L. O'Brien, I. Roll, A. Kampen et N. Davoudi, «Rethinking (Dis)engagement in human-computer interaction,» *Computers in Human Behavior*, vol. 128, 2022.
- [51] A. Streicher et J. D. Smeddinck, «Personalized and Adaptive Serious Games,» *Entertainment Computing and Serious Games*, vol. 15, pp. 332-377, 2016.
- [52] K. Chrysafiadi, S. Papadimitriou et M. Virvou, «Cognitive-based adaptive scenarios in educational games using fuzzy reasoning,» *Knowledge-Based Systems*, vol. 250, 2022.
- [53] J. Ulmer, S. Braun, C.-T. Cheng, S. Dowey et J. Wollert, «Human-Centered Gamification Framework for Manufacturing Systems,» *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 670-675, 2020.
- [54] J. Ulmer, S. Braun, C.-T. Cheng, S. Dowey et J. Wollert, «Adapating Augmented Reality Systems to the users' needs using Gamification and error solving methods,» *Procedia CIRP*, vol. 104, pp. 140-145, 2021.

- [55] J. Geng, X. Song, Y. Pan, J. Tang, Y. Liu, D. Zhao et Y. Ma, «A systematic design method of adaptive augmented reality work instruction for complex industrial operations,» *Computers in Industry*, n° %1119, 2020.
- [56] T. Engelke, J. Keil, P. Rojtberg, F. Wientapper, M. Schmitt et U. Bockholt, «Content first: a concept for industrial augmented reality maintenance applications using mobile devices,» *2013 IEEE Int. Symp. Mix. Augment. Reality, ISMAR 2013*, pp. 251-252, 2013.
- [57] X. Wang, S. Ong et A. Nee, «Multi-modal augmented-reality assembly guidance based on bare-hand interface,» *Advanced Engineering Informatics*, n° %130, pp. 406-421, 2016.
- [58] Siew, Ong et Nee, «A practical augmented reality-assisted maintenance system framework for adaptive user support,» *Robotics and Computer Intergrated Manufacturing*, pp. 115-129, 2019.
- [59] J. A. Erkoyuncu, I. F. del Amo, M. D. Mura, R. Roy et G. Dini, «Improving efficiency of industrial maintenance with context aware adaptive authoring in augmented reality,» *Manufacturing Technology*, pp. 465-468, 2017.
- [60] M. Gatullo, G. W. Scurati, M. Fiorentino, A. E. Uva, F. Ferrise et M. Bordegoni, «Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology,» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 56, pp. 276-286, 2019.
- [61] D. Biskup, «Single-machine scheduling with learning considerations,» *European Journal of Operational Research*, vol. 115, pp. 173-178, 1999.
- [62] M. E. C. Santos, A. Chen et T. Taketomi, «Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation,» *IEEE Transactions on Learning Technologies*, vol. 7, n° %11, 2014.
- [63] P. S. Dunston et X. Wang, «A hierarchical taxonomy of aec operations for mixed reality applications,» *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 16, pp. 433-444, 2008.

- [64] R. W. Proctor et T. Van Zandt, *Human Factors in Simple and Complex Systems*, Allyn & Bacon, 1994.
- [65] Q. Loizeau, «Méthodologie de mise en oeuvre d'un dispositif de réalité augmentée en milieu industriel : application à la maintenance,» 2021.
- [66] W. Li, J. Wang, S. Jiao, M. Wang et S. Li, «Research on the visual elements of augmented reality assembly processes,» *Virtual Reality & Intelligent Hardware*, vol. 1, n° 16, pp. 622-634, 2019.
- [67] M. Gatullo, A. E. Uva, M. Fiorentino et J. L. Gabbard, «Legibility in Industrial AR: Text Style, Color Coding & Illuminance,» chez *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2015.
- [68] N. Petersen et D. Stricker, «Cognitive Augmented Reality,» *Computers & Graphics*, vol. 53, pp. 82-91, 2015.
- [69] L. R. Novick et D. L. Morse, «Folding a fish, making a mushroom: The role of diagrams in executing assembly procedures,» *Memory & Cognition*, vol. 28, n° 17, pp. 1242-1256, 2000.
- [70] S. G. Hart et L. E. Staveland, «Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,» *Advances in Psychology*, vol. 52, pp. 139-183, 1988.
- [71] S. G. Hart, «NASA-Task Load Index (NASA-TLX); 20 years later,» chez *PROCEEDINGS of the HUMAN FACTORS AND ERGONOMICS SOCIETY 50th ANNUAL MEETING*, 2006.
- [72] M. Hertzum, «Reference Values and Subscale Patterns for the Task Load Index (TLX): A Meta-Analytic Review,» *Ergonomics*, vol. 64, n° 17, pp. 869-878, 2021.

- [73] J. Cegarra et A. Chevalier, «The use of Tholos software for combining measures of mental workload: Toward theoretical and methodological improvements,» *Behavior Research Methods*, vol. 40, n° % 14, pp. 988-1000, 2008.
- [74] J. A. Veltman et A. W. K. Gaillard, «Physiological indices of workload in a simulated flight task,» *Biological Psychology*, vol. 42, pp. 323-342, 1996.
- [75] U. Ahlstrom et F. J. Friedman-Berg, «Using eye movement activity as a correlate of cognitive workload,» *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 36, pp. 623-636, 2006.
- [76] S.-L. Hwang, Y.-J. Yau, Y.-T. Lin, J.-H. Chen, T.-H. Huang, T.-C. Yenn et C.-C. Hsu, «Predicting work performance in nuclear power plants,» *Safety Science*, vol. 46, n° % 17, pp. 1115-1124, 2008.
- [77] R. L. Charles et J. Nixon, «Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review,» *Applied Ergonomics*, vol. 74, pp. 221-232, 2019.
- [78] A. M. Hughes, G. M. Hancock, S. L. Marlow, K. Stowers et E. Salas, «Cardiac Measures of Cognitive Workload: A Meta-Analysis,» *Human Factors*, vol. 61, n° % 13, 2019.
- [79] H. Eisenbarth, «Methods in Cognitive Neuroscience: A primer for Forensic Psychologists,» *Psychology, Crime & Law*, 2018.
- [80] W. Klimesch, «EED-alpha rythms and memory processes,» *International Journal of Psychophysiology*, vol. 26, pp. 319-340, 1997.
- [81] L. R. Fournier, G. F. Wilson et C. R. Swain, «Electrophysiological, behavioral, and subjective indexes of workload when performing multiple tasks: manipulations of tasks difficulty and training,» *International Journal of Psychophysiology*, vol. 31, pp. 129-145, 1999.

- [82] J. Polvi, T. Taketomi, A. Moteki, T. Yoshitake, T. Fukuoka, G. Yamamoto, C. Sandor et H. Kato, «Handheld Guides in Inspection Tasks: Augmented Reality versus Picture,» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 24, n° %17, 2018.
- [83] M. Grassmann, E. Vlemincx, A. von Leupoldt, J. M. Mittelstädt et O. Van den Bergh, «Respiratory Changes in Response to Cognitive Load: A Systematic Review,» *Neural Plasticity*, 2016.
- [84] Dassault Systèmes, «DELMIA Augmented Experience | Dassault Systèmes,» [En ligne]. Available: <https://www.3ds.com/products/delmia/augmented-experience>. [Accès le Mars 2023].
- [85] PTC, «Vuforia Engine : Créer des apps de réalité augmentée | PTC,» [En ligne]. Available: <https://www.ptc.com/fr/products/vuforia/vuforia-engine>. [Accès le Février 2023].
- [86] Microsoft, «Documentation du développeur MRTK2-Unity - MRTK 2,» [En ligne]. Available: <https://learn.microsoft.com/fr-fr/windows/mixed-reality/mrktk-unity/mrktk2/?view=mrktkunity-2022-05>. [Accès le Mars 2023].
- [87] J. L. Gabbard, D. G. Mehra et J. E. Swan, «Effects of ar display context switching and focal distance switching on human performance,» *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 25, n° %16, pp. 2228-2241, 2019.
- [88] M. Drouot, N. Le Bigot, J.-L. de Bourgenet et V. Nourrit, «Effect of Context and Distance Switching on Visual Performances in Augmented Reality,» *2021 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, pp. 476-477, 2021.
- [89] Y. Arifin, T. G. Sastria et E. Barlian, «User Experience Metric for Augmented Reality Application: A Review,» *Procedia Computer Science*, n° %1135, pp. 648-656, 2018.

- [90] O. Danielsson, M. Holm et A. Syberfeldt, «Augmented reality smart glasses for operators in production: Survey of relevant categories for supporting operators,» *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 1298-1303, 2020.
- [91] J. Brooke, «SUS: a « quick and dirty » usability scale,» *Usability Evaluation in Industry*, 1996.
- [92] L. J. Prinzl, F. G. Freeman, M. W. Scerbo, P. Mikulka et A. T. Pope, «A Closed-Loop System for Examining Psychophysiological Measures for Adaptive Task Allocation,» *The International Journal of Aviation Psychology*, vol. 10, n° 14, pp. 393-410, 2000.
- [93] J. R. Lewis, «Psychometric Evaluation of the Post-Study System Usability Questionnaire : The PSSUQ,» chez *PROCEEDINGS of the HUMAN FACTORS SOCIETY 36th ANNUAL MEETING*, 1992.

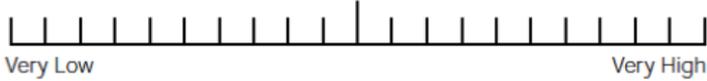
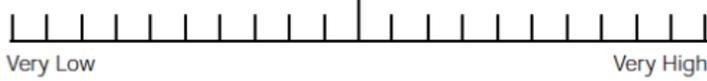
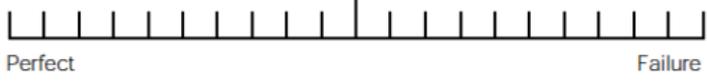
Annexes

Annexe 1 : Questionnaire NASA-TLX

Figure 8.6

NASA Task Load Index

Hart and Staveland's NASA Task Load Index (TLX) method assesses work load on five 7-point scales. Increments of high, medium and low estimates for each point result in 21 gradations on the scales.

Name	Task	Date
<p>Mental Demand How mentally demanding was the task?</p> 		
<p>Physical Demand How physically demanding was the task?</p> 		
<p>Temporal Demand How hurried or rushed was the pace of the task?</p> 		
<p>Performance How successful were you in accomplishing what you were asked to do?</p> 		
<p>Effort How hard did you have to work to accomplish your level of performance?</p> 		
<p>Frustration How insecure, discouraged, irritated, stressed, and annoyed were you?</p> 		

Annexe 2 : Questionnaire SUS

System Usability Scale

	Pas du tout d'accord					Tout à fait d'accord
1. Je pense que je vais utiliser ce service fréquemment	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
2. Je trouve ce service inutilement complexe	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
3. Je pense que ce service est facile à utiliser	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
4. Je pense que j'aurai besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce service	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
5. J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce service ont été bien intégrées	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
6. Je pense qu'il y a trop d'incohérence dans ce service.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
7. J'imagine que la plupart des gens serait capable d'apprendre à utiliser ce services très rapidement.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
8 J'ai trouvé ce service très lourd à utiliser.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
9. Je me sentais très en confiance en utilisant ce service.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	
10. J'ai besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser ce service.	<input type="checkbox"/>					
	1	2	3	4	5	

Annexe 2 : Questionnaire SUS

Manuel de maintenance adaptatif en Réalité Augmentée : Application à l'inspection de pièces de structure

Résumé

Ce sujet de thèse de doctorat se situe dans le domaine de la réalité augmentée pour l'assistance à la maintenance sur des pièces de structure d'équipements aéronautique. Le projet a pour cadre une collaboration entre les Arts et Métiers au travers du laboratoire LISPEN et le groupe SAFRAN. Le groupe SAFRAN est engagé dans une stratégie de développement d'outils numériques dans le but d'apporter de nouveaux services aux compagnies aériennes et aux acteurs de la MRO « Maintenance, Repair and Overhaul ». Ce projet s'inscrit dans cette démarche, l'objectif principal étant de proposer une aide aux opérations de maintenance personnalisée par l'utilisation de technologies de réalité augmentée.

Les différents travaux menés dans le cadre de cette activité de recherche doivent donc permettre de proposer une méthodologie destinée à la conception de systèmes de réalité augmentée adaptatif permettant d'assister au mieux les opérateurs lors d'opérations de maintenance et de diagnostic de pièces de structure. Un tel système doit bien être capable de fournir une quantité d'informations proportionnée en fonction de l'expertise de chacun. Cette façon de procéder pourrait ainsi permettre à la fois d'améliorer les performances des opérateurs lors de l'exécution des opérations de maintenances mais aussi d'améliorer l'acceptabilité des opérateurs concernant l'introduction de ce genre de système d'assistance. Bien que ce genre de système commence à émerger dans la littérature, leur impact sur la charge cognitive des opérateurs comparé à des systèmes d'assistance non-adaptative en réalité augmentée reste mal connu. De plus, sans cadre théorique commun, la diversité des propositions présentées dans la littérature empêche de comparer les résultats entre différentes études. C'est pourquoi nous proposons une méthodologie destinée à la conception, la mise en œuvre et l'évaluation de systèmes d'assistance adaptative en réalité augmentée. Les expérimentations menées sur la base de cette méthodologie montrent que l'utilisation de systèmes d'assistance adaptative permettent de mieux répondre aux besoins d'opérateurs ayant des niveaux d'expertise différents. D'autres résultats indiquent toutefois que dans certaines conditions, la mauvaise gestion de l'adaptation des contenus et de l'expérience globale délivrée par le système peut conduire à une hausse de la charge cognitive. Cet effet peut cependant être modulé en ajustant soigneusement la stratégie d'adaptation selon le cas d'usage rencontré.

Mots clés :

Réalité augmentée, Maintenance, Assistance adaptative

Résumé en anglais

This doctoral thesis topic is in the field of augmented reality (AR) for aeronautical maintenance. The project is part of a collaboration between the Arts et Métiers institute of technology and the SAFRAN group. The SAFRAN group is engaged in a strategy of developing digital tools to provide new services to airlines and MRO "Maintenance, repair and overhaul" actors. This project is part of this approach; the main objective is to provide custom support for aeronautical maintenance with augmented reality technologies. In the end, the study will have to propose a system based on augmented reality technology that will assist operators on maintenance and diagnosis operations on structural parts. Although this type of system already exists in the literature, their impact on operators' cognitive load compared to standardize augmented reality assistance systems remains poorly understood. Moreover, without a common theoretical framework, the diversity of proposals presented in the literature prevents the comparison of results between different studies. This is why we propose a framework for the design, the implementation, and the evaluation of adaptive assistance systems in augmented reality. The experiments built on this methodology and carried out during this research project demonstrate that the use of the adaptive assistance system can, under certain conditions, lead to an increase in cognitive load. However, the results also show that this increase can be reduced by modifying the adaptation strategy that drive the presentation of information to the operator.

Keywords:

Augmented reality, Maintenance, Adaptive assistance