

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus



Thèse

Présentée en vue de l'obtention du titre de
Docteur en Sciences

en Automatique
par

Samir BENBELKACEM
Magister en Génie électrique de l'ENP

Intitulé :

**CONCEPTION ET ÉVALUATION DE SYSTÈMES
INTERACTIFS POUR LA MAINTENANCE DES SYSTÈMES
INDUSTRIELS: THÉORIE ET APPLICATIONS**

Soutenue publiquement le 20 Mars 2014 à l'amphi A3 à 10h devant le jury composé de :

M. BERKOUK	Professeur à l'ENP	Président
M. TADJINE	Professeur à l'ENP	Rapporteur
M. BELHOCINE	Maître de recherche « A » au CDTA	Rapporteur
F. L. BOUMGHAR	Professeur à l'USTHB	Examineur
S. OTMANE	Professeur à l'Université d'Evry, Paris, France	Examineur
M. AHMED NACER	Professeur à l'USTHB	Examineur
N. ZENATI-HENDA	Maître de recherche « B » au CDTA	Invitée
A. DINIS	Directeur de VIRTUALDIVE, Paris, France	Invité

Année 2014

Thèse préparée au Laboratoire de Commande des Processus de l'ENP
10, Avenue Hassen Badi, BP 182, 16200 El-Harrach, Alger

Dieu merci

Je remercie Dieu, le tout puissant, de m'avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour affronter les difficultés et les obstacles que j'ai rencontrés durant ma thèse. Grace à lui, j'ai pu mener à terme mon doctorat.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents (ma mère et mon père qui m'ont déjà dédié leur vie entière), ma chère femme sans oublier mon enfant "Zyad" et mon cher frère Amine. Je les remercie pour leur sacrifice, leur patience, leur soutien, l'aide et les encouragements qu'ils m'ont apportés durant toutes ces années d'étude. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

Je dédie ce travail également :

A la mémoire de mes regrettés grands parents.

A la mémoire de ma grande mère maternelle

A ma grande mère paternelle.

A tous les membres de ma famille.

A tous mes chers amis.

A toute personne qui porte de l'estime pour moi.

Remerciements

Le travail que nous présentons dans cette thèse a été effectué à la Division Robotique et Productique du Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) de Baba-Hassen (Alger) et au Laboratoire de Commande des Processus de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'El-Harrach (Alger), sous la direction de Monsieur Mahmoud BELHOCINE et de Monsieur Mohamed TADJINE.

Je tiens à remercier très vivement mes encadreurs, à savoir Monsieur Mahmoud BELHOCINE, Maître de recherche "A" au CDTA, et Monsieur Mohamed TADJINE, Professeur à l'ENP, pour avoir accompagné mon travail durant mon cursus de doctorat. Les judicieux conseils qu'ils m'ont prodigués, leur enthousiasme envers mon travail ainsi que leur grande disponibilité m'ont permis de progresser dans mes études et d'achever ce travail dans de meilleures conditions. Je tiens à leur exprimer toute mon amitié et ma reconnaissance.

Que Monsieur El Madjid BERKOUK, Professeur à l'ENP, reçoive l'expression de ma très vive reconnaissance d'avoir accepté de présider ce jury.

Qu'il me soit ensuite permis de remercier très vivement Madame Fatima Linda OULEBSIR-BOUMGHAR, Professeur à l'USTHB, Monsieur Samir OTMANE Professeur à l'Université d'Evry Val d'Essonne, Paris et Monsieur Mohamed AHMED NACER, Professeur à l'USTHB pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être les examinateurs de cette thèse. Je les remercie pour l'intérêt qu'ils ont montré envers mes travaux.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à Madame Nadia ZENATI-HENDA pour l'aide et les encouragements qu'elle m'a apportés. Je remercie, aussi, Monsieur Alain DINIS, Directeur de VIRTUALDIVE, Paris, de nous avoir honorés par sa présence dans le jury. J'adresse, entre-autre, un remerciement au Directeur du CDTA, au Directeur de la Division Robotique et Productique ainsi qu'aux membres de la division pour leur soutien. Un grand merci est adressé aux membres de l'équipe VAANIM, et plus particulièrement à Monsieur Abdelkader BELLARBI, pour leur aide précieuse.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à ma famille pour leur précieuse aide dans l'accomplissement de ce travail. Je souhaite aussi dire un grand merci à tous mes amis pour leur soutien.

العنوان: تصميم وتقييم نظم تفاعلية لصيانة التجهيزات الصناعية: دراسة نظرية و تطبيقية

ملخص

في هذه الأطروحة، نقترح نهجا لإنشاء نظم تفاعلية لدعم الصيانة الصناعية، بالاعتماد على طريقة الواقع المختلط. من جانب نظري، مساهمتنا تشمل تمديد طريقة 2TUP وذلك لدمج خصائص الواقع المختلط والأنظمة التفاعلية و احتياجات عامل الصيانة و الظروف المحيطة بهذا الأخير.

وقد مكنتنا الطريقة المقترحة من إنجاز نظام تفاعلي ملموس ذو واقع مختلط "SIT-RM". لقد قمنا بتطوير واجهات متعددة الوسائط في الأجهزة المحمولة للسماح لعامل الصيانة بمشاهدة هذه الواجهات في المجال الحقيقي و أن يتفاعل مع نماذج ثلاثي الأبعاد التي تمثل مهام الصيانة. بالإضافة إلى ذلك، قمنا باقتراح صياغة لصيانة الأجهزة بطريقة جماعية للسماح للتقنيين والخبراء عن بعد تقاسم وتبادل المعلومات المتعلقة ب: نماذج ثلاثي الأبعاد، رسائل إلكترونية، إتصالات صوتية، الخ.

النظام التفاعلي الملموس ذو واقع مختلط "SIT-RM" استخدم بعد ذلك لتنفيذ مهام الصيانة في نظام ضخ المياه بالطاقة الشمسية و في محركات السيارات .

في الأخير تم القيام بدراسة تقويمية لنظام "SIT-RM" و الواجهات المتعددة الوسائط المطورة على عينة من مصلحي الآلات. الذين أشاروا إلى أن نظام "SIT-RM" يحسن طريقة صيانة الآلات.

كلمات رئيسية: دعم الصيانة، نظم المعلومات، واقع مختلط، نظام تفاعلي، تفاعل ثلاثي الأبعاد.

Abstract

In this work, an approach for developing interactive maintenance assistance systems based on the mixed reality paradigm is proposed.

From the theoretical point of view, our contribution is concerned with the extension of the 2TUP method by integrating the mixed reality's properties, the technicians' requirements and the maintenance context. Tangible interactive mixed reality system "SIT-RM" is then realized using the proposed method. "SIT-RM" is then integrated in a mobile and cooperative maintenance platform implemented in our laboratory. Multimodal and mobile interfaces have then been developed, allowing repairers to view and interact, in real environment, with maintenance tasks' 3D models. Also, a cooperative maintenance solution has been developed in order to allow technicians and remotes experts sharing and exchanging data such as: 3D representations, messages, speech communication, etc. "SIT-RM" system has, thereafter, been used to perform maintenance tasks on a photovoltaic pumping system and car engines.

Finally, an evaluation study of the "SIT-RM" system and the interactive interfaces implemented has been conducted with repairers. They show that the "SIM-RM" system improves the maintainability and the availability of the maintained equipments.

Keywords: maintenance assistance, maintenance process, information system, mixed reality, interactive system, human-system interaction, tracking, 3D interaction, maintainability, equipment availability.

Résumé

Dans cette thèse, nous proposons une approche pour le développement des systèmes interactifs pour l'aide à la maintenance industrielle en introduisant le paradigme de la réalité mixte.

D'un point de vue théorique, notre contribution consiste en l'extension de la méthode 2TUP pour intégrer les propriétés de la réalité mixte, des systèmes interactifs, des besoins des opérateurs et du contexte de la maintenance. La méthode proposée nous a permis de réaliser un Système Interactif Tangible de Réalité Mixte "SIT-RM" intégré dans une plateforme de maintenance coopérative et mobile mise en œuvre dans notre laboratoire. Nous avons développé des interfaces multimodales et mobiles pour permettre aux réparateurs de visualiser et d'interagir, dans un environnement réel, avec des modèles 3D représentant des tâches de maintenance. En outre, une solution de maintenance coopérative a été développée permettant à des techniciens et des experts distants de partager et d'échanger plusieurs formes d'informations : représentations 3D, messagerie, communication vocale, etc. Le système "SIT-RM" a été utilisé, par la suite, pour réaliser des tâches de maintenance sur un système de pompage photovoltaïque et sur des moteurs de voiture.

Enfin, une étude d'évaluation du système "SIT-RM" et des interfaces interactives développées a été réalisée avec un échantillon de réparateurs. Ces derniers estiment que le système "SIT-RM" améliore sensiblement la maintenabilité et la disponibilité des équipements maintenus.

Mots-clés : aide à la maintenance, processus de maintenance, système d'information, réalité mixte, système interactif, interaction homme-système, suivi et recalage, interaction 3D, maintenabilité, disponibilité d'un équipement.

Table des matières

Dédicaces

Remerciements

Résumés

Notations et abréviations

Introduction générale.....1

I Etat de l'art

Chapitre I La maintenance industrielle et les technologies émergentes

I.1.Introduction.....	7
I.2.La maintenance dans un contexte industriel.....	8
I.2.1.Notions fondamentales.....	8
I.2.2.Système d'information et système informatique en maintenance.....	9
I.2.3.Processus de maintenance.....	9
I.2.3.1.Données utilisées dans un processus de maintenance.....	10
I.2.3.2 Acteurs impliqués dans un processus de maintenance.....	10
I.2.4.Architectures des systèmes de maintenance.....	11
I.3.Le facteur humain dans un processus de maintenance.....	12
I.4.L'aide à la maintenance.....	13
I.5.Types d'aide ou d'assistance.....	14
I.5.1. Assistance basée sur la documentation.....	14
I.5.2. Assistance basée sur la conversation téléphonique.....	16
I.5.3. Les technologies émergentes et tendance dans la maintenance.....	16
I.5.3.1 Intérêt des technologies émergentes pour la tâche de maintenance.....	16
I.5.3.2 Intérêt des technologies émergentes pour l'opérateur de maintenance.....	17
I.6. Technologies émergentes : systèmes interactifs et nouveaux paradigmes d'interaction.....	17
I.6.1.Systèmes interactifs.....	17
I.6.2.Evolution des systèmes interactifs.....	18
I.6.3.Nouveaux paradigmes d'interaction.....	19
I.6.3.1.Réalité augmentée.....	20
I.6.3.2.Réalité mixte.....	20
I.6.3.3.Informatique ubiquitaire.....	21
I.6.3.4.Interfaces tangibles.....	21
I.6.4.Systèmes Interactifs Mixtes.....	22
I.6.5.Prototypage des systèmes interactifs mixtes.....	23

I.6.5.1.Couche « Utilisateur ».....	24
I.6.5.2.Couche « Application ».....	24
I.6.5.3.Couche intermédiaire.....	24
I.6.5.4.Couche de base.....	24
I.7. Applications des systèmes interactifs mixtes.....	26
I.7.1 Systèmes interactifs mixtes dans l'industrie.....	26
I.7.2 Systèmes interactifs mixtes dans le domaine de la maintenance.....	26
I.7.2.1.Systèmes interactifs avec assistance automatisée.....	26
I.7.2.2.Systèmes interactifs avec assistance supervisée.....	28
I.8. Conclusion.....	29

Chapitre II Systèmes interactifs mixtes (SIM) : approches et méthodes de développement

II.1.Introduction.....	30
II.2. Pourquoi le développement des systèmes interactifs ?.....	31
II.3 Processus de développement et modèles de conception pour les systèmes interactifs.....	31
II.3.1.Phase d'analyse.....	31
II.3.1.1 Analyse du processus métier ou processus fonctionnel.....	32
II.3.1.2 Spécification des besoins.....	32
II.3.1.3 Analyse des besoins.....	32
II.3.2.Phase de conception.....	32
II.3.3.Phase d'implémentation.....	32
II.3.4.Phase d'évaluation.....	33
II.4 Méthodes de développement des systèmes interactifs.....	33
II.4.1 Méthodes de conception de Génie Logiciel (GL).....	33
II.4.1.1. Cycle de développement en cascade.....	33
II.4.1.2. Cycle de développement en V.....	34
II.4.1.3. Cycle de développement en spirale.....	35
II.4.1.4. Les processus unifiés (Unified Process).....	35
II.4.1.5. Processus RUP (Rational Unified process).....	36
II.4.1.6. Processus XP (eXtreme Programming).....	37
II.4.2 Méthodes pour la conception des Interfaces Homme-Machine (IHM).....	38
II.4.2.1. Le prototypage.....	38
II.4.2.2. Modèle en couches.....	38
II.4.2.3. Modèle en cercle.....	39
II.4.2.4 Conception centrée utilisateur (ISO 13407).....	40
II.4.2.5 Conception centrée usage.....	41
II.5. Fusion des pratiques de GL et d'IHM pour le développement des systèmes interactifs mixtes.....	42
II.5.1. Spécificités des systèmes de réalité mixte.....	42
II.5.2 Modèles et outils nécessaires pour la conception de systèmes interactifs mixtes (SIM)....	43
II.5.2.1. Modélisation sous forme de scenarii.....	43
II.5.2.2. Modélisation basée sur l'analyse de la tâche de l'utilisateur.....	44

II.5.2.3. Modélisation de l'interaction utilisateur-système.....	45
II.5.3 Méthodes de développement des systèmes interactifs mixtes.....	47
II.5.3.1. Méthode de développement des SIM collaboratifs et mobiles.....	47
II.5.3.2. Méthode de développement des SIM basée sur une approche ergonomique.....	48
II.5.3.3. Méthode basée sur le couplage de la conception et de l'implémentation.....	49
II.5.3.4. Méthode de développement des SIM basée sur les modèles d'architecture logicielle.....	50
II.5.3.5. Méthode Symphony pour la conception des SIM.....	50
II.5.3.6. Méthode de développement d'applications de réalité augmentée de J. M. Ciutat.....	52
II.6. Synthèse et discussion.....	53
II.7. Conclusion.....	54

II Contribution

Chapitre III Méthode 2TUP étendue : support méthodologique pour le développement des SIM appliqué à la maintenance industrielle

III.1. Introduction.....	55
III.2. La méthode 2TUP.....	55
III.2.1. Propriétés de la méthode 2TUP.....	57
III.2.2. Limites de la méthode 2TUP.....	58
III.3. Méthode 2TUP étendue : principes et approches.....	58
III.3.1. Fusion des pratiques et activités de GL et IHM.....	60
III.3.2. Activité de collaboration pour la conception.....	61
III.3.3. Un modèle pour formaliser les besoins d'interaction : les objets d'interaction.....	61
III.3.4. Artefacts (processus, modèles et outils).....	63
III.4. Développement de la méthode proposée sur un cas d'étude.....	64
III.4.1. Etude préliminaire.....	64
III.4.2. Spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction.....	65
III.4.2.1. Spécification des besoins fonctionnels.....	66
III.4.2.2. Spécification des besoins d'interaction.....	67
III.5. Evolution de l'espace métier.....	72
III.5.1. Evolution des objets métier.....	73
III.5.2. Evolution des activités métier.....	73
III.5.3. Evolution des processus métier.....	73
III.6. Phase d'analyse.....	74
III.6.1. Analyse statique.....	74
III.6.2. Analyse dynamique.....	75
III.7. Évaluation de la méthode 2TUP étendue et discussion.....	77
III.7.1. Évaluation de l'effectivité réelle de la méthode.....	79
III.7.2. Évaluation de la perception de la facilité d'utilisation de la méthode.....	80
III.7.2.1. Discussion.....	84
III.8. Conclusion.....	86

Chapitre IV Développement d'un système interactif mixte pour l'aide à la maintenance

IV.1.Introduction.....	87
IV.2.Plateforme de maintenance basée sur la réalité mixte « ARIMA ».....	87
IV.2.1.Fonctionnement de la plateforme ARIMA.....	89
IV.2.2.Scénario global de maintenance.....	90
IV.3 Développement d'un système interactif mixte d'aide à la maintenance pour la plateforme ARIMA.....	91
IV.3.1.Module de suivi/recalage.....	92
IV.3.1.1.Seuillage dynamique pour la reconnaissance des marqueurs.....	93
IV.3.1.2.Stabilisation des objets virtuels.....	94
IV.3.1.3.Algorithme global.....	96
IV.3.1.4. Choix de marqueurs pour réaliser une opération de maintenance.....	97
IV.3.2.Module d'interaction 2D/3D.....	99
IV.3.3.Module de rendu.....	101
IV.3.4.Module générateur multimédia.....	101
IV.3.5.Couche « Interface ».....	101
IV.4. Expérimentation.....	102
IV.4.1.Système interactif mixte pour la maintenance des systèmes de pompage photovoltaïque (PV).....	102
IV.4.2.Système interactif mixte pour la maintenance des moteurs de voiture.....	106
IV.4.2.1.Système interactif d'aide sur le smartphone Samsung Galaxy S1.....	107
IV.4.2.2.Système interactif d'aide à la maintenance sur le casque HMD vidéo Vuzix Wrap 920AR.....	108
IV.5. Evaluations expérimentales du système "SIT-RM".....	109
IV.5.1.Evaluation expérimentale de la méthode de suivi/recalage développée « i-ARToolkit ».....	109
IV.5.2. Evaluation expérimentale des interfaces d'aide développées.....	112
IV.5.2.1.Protocole expérimental.....	113
IV.6. Conclusion.....	122
Conclusion générale.....	123
Références bibliographiques.....	127
Webographie.....	140
Annexes.....	141
Production scientifique.....	161

Table des figures

Figure 1.1.Types de maintenance [154].....	8
Figure 1.2.Types des erreurs dans une activité de maintenance.....	12
Figure 1.3.Schéma de principe d'un système interactif.....	18
Figure 1.4.Evolution des systèmes interactifs selon Charfi [64].....	19
Figure 1.5.Exemples de systèmes de réalité augmentée.....	20
Figure 1.6.Exemple d'interface tangible (Cuisine "Verte" de Philips Design).....	21
Figure 1.7.Les différents styles d'interaction dans le cas des systèmes interactifs [149].....	22
Figure 1.8.Taxonomie sur la réalité mixte selon Milgram [123] et Dubois [84].....	23
Figure 1.9.Modules d'un système interactif mixte.....	23
Figure 2.1. Cycle de développement en cascade.....	34
Figure 2.2. Cycle de développement en V.....	34
Figure 2.3. Cycle de développement en spirale.....	35
Figure 2.4. Organisation de la méthode UP.....	36
Figure 2.5. Organisation de la méthode RUP.....	36
Figure 2.6. Cycle de développement XP [Wiki_xp].....	37
Figure 2.7. Méthode d'IHM basée sur le prototypage.....	38
Figure 2.8. Modèle en couches.....	39
Figure 2.9. Modèle en cercle.....	39
Figure 2.10. Processus de conception centré utilisateur selon la norme ISO 13407.....	41
Figure 2.11. Exemple de cas d'utilisation essentiel [70].....	41
Figure 2.12 Exemple d'interface abstraite [70].....	42
Figure 2.13. Diagramme de tâches utilisant le formalisme CTT.....	45
Figure 2.14. Modèle IRVO pour une application de e-maintenance.....	47
Figure 2.15. Méthode de développement pour les systèmes interactifs mixtes [150].....	48
Figure 2.16. Méthode de développement des SIM selon Charfi [63].....	48
Figure 2.17. Organisation pyramidale de l'approche proposée par Gauffre [93] pour le développement des SIM.....	49
Figure 2.18. Adaptation du modèle d'architecture PAC-Amodeus pour le développement d'un système de réalité augmentée [188].....	50
Figure 2.19. Extension de la méthode Symphony pour le développement des systèmes de réalité augmentée [95].....	51
Figure 3.1. Méthode 2TUP originale [155].....	56
Figure 3.2. Méthode 2TUP étendue [31].....	58
Figure 3.3. Extrait de la cartographie des objets d'interaction.....	61

Figure 3.4. Exemple d'utilisation de la relation « décrire ».....	62
Figure 3.5. Extrait du modèle d'analyse des objets d'interaction.....	62
Figure 3.6. Diagramme d'activité de l'étude préliminaire.....	65
Figure 3.7. Phase de spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction.....	66
Figure 3.8. Diagramme des cas d'utilisation du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".....	66
Figure 3.9. Phase de spécification des besoins d'interaction.....	67
Figure 3.10. Diagramme de tâches CTT pour le sous-processus "mettre à jour une procédure de maintenance".....	70
Figure 3.11. Diagramme IRVO de l'application.....	71
Figure 3.12. Evolution du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".....	71
Figure 3.13. Exemple de prototype d'interface sur le casque de visualisation HMD du réparateur.....	72
Figure 3.14. Evolution de l'espace métier.....	72
Figure 3.15. Modèle statique qui décrit l'espace métier et l'espace d'interaction.....	75
Figure 3.16. Extrait du modèle dynamique de l'espace métier.....	76
Figure 3.17. Extrait du modèle dynamique de l'espace d'interaction.....	76
Figure 3.18. Correspondance entre les objets d'interaction et les objets métier.....	77
Figure 3.19. Modèle d'évaluation de Moody [125].....	78
Figure 4.1. Architecture de maintenance développée dans notre laboratoire.....	88
Figure 4.2. Architecture matérielle de notre plateforme ARIMA.....	88
Figure 4.3. Le technicien travail avec son dispositif mobile (mode en hors connexion).....	89
Figure 4.4. Le mobile du technicien se connecte localement aux serveurs de la plateforme ARIMA...89	89
Figure 4.5. Processus de coopération entre un technicien et un expert.....	90
Figure 4.6. Modules du système interactif tangible développé.....	91
Figure 4.7. Exemples de marqueurs d'ARToolkit conçus pour nos applications.....	92
Figure 4.8. Schéma montrant le seuil optimal d'Otsu.....	93
Figure 4.9. Positionnement d'une caméra par rapport à un marqueur.....	95
Figure 4.10. Représentation graphique de l'expression $\frac{\Delta x}{x} = f(d)$	95
Figure 4.11. Taille du marqueur (d -mm) en fonction à la distance (x -mm) et de l'angle (Ω -degré).....	97
Figure 4.12. Détermination de la distance maximale de détection ($d_{\text{detectmax}}$) pour différents marqueurs.....	98
Figure 4.13. Stylet virtuel affiché sur un marqueur tangible et utilisé pour interagir avec des objets virtuels.....	99
Figure 4.14. Système de pompage.....	102
Figure 4.15. Générateur photovoltaïque.....	102
Figure 4.16. Marqueurs collés sur des composants du système de pompage PV.....	103
Figure 4.17. Schéma montrant l'emplacement des capteurs dans un système de pompage PV.....	104
Figure 4.18. Diagnostic du groupe motopompe représenté sous forme 3D.....	104
Figure 4.19. Liste des diagnostics affichés sur l'interface de la tablette MSI WindPad 110W.....	104
Figure.4.20. Tâche augmentée N°1: "vérifier l'état de l'interrupteur".....	105
Figure.4.21. Tâche augmentée N°2: "vérifier le fonctionnement des shunts".....	105

Figure.4.22. Tâches augmentées N°3: "vérifier le niveau dans le puits" et N°4: "contrôler le groupe motopompe".....	105
Figure 4.23. Marqueurs collés sur les moteurs Peugeot 206 (à gauche) et Chevrolet Spark (à droite).....	106
Figure 4.24. Liste de pannes et diagnostics répertoriés sur le smartphone Samsung Galaxy S1.....	107
Figure 4.25. Interface interactive sur Samsung Galaxy S1 pour la maintenance du moteur Peugeot 206.....	107
Figure 4.26. Interface interactive sur Samsung Galaxy S1 pour la maintenance du moteur Peugeot 206.....	108
Figure 4.27. Interface interactive sur casque HMD Vuzix pour la maintenance du moteur Chevrolet Spark.....	109
Figure 4.28. Marges des erreurs de position selon l'axe X.....	109
Figure 4.29. Marges des erreurs de position selon l'axe Y.....	109
Figure 4.30. Marges des erreurs de position selon l'axe Z.....	110
Figure 4.31. Marges des erreurs d'orientation selon l'axe X.....	110
Figure 4.32. Marges des erreurs d'orientation selon l'axe Y.....	110
Figure 4.33. Marges des erreurs d'orientation selon l'axe Z.....	110
Figure 4.34. Marges des erreurs de position.....	111
Figure 4.35. Marges des erreurs d'orientation.....	111
Figure 4.36. Temps de réalisation de la tâche de maintenance: vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.....	115
Figure 4.37. Temps de réalisation des tâches de maintenance "vérifier si un ou plusieurs câbles sont déconnectés (tâche N°1)" et "nettoyer le panneau solaire (tâche N°2)".....	116
Figure 4.38. Taux moyen de réussite d'une tâche de maintenance.....	118
Figure 4.39. Avis des participants sur la difficulté de réaliser une tâche de maintenance.....	119
Figure A.1. Cockpits des avions.....	145
Figure A.2. Vitrine interactive de découverte des produits (magasin de Sony à Paris).....	146
Figure A.3. Prototypes de tables interactives développés au CDTA.....	146
Figure A.4. Utilisation de la réalité mixte sous l'eau.....	147
Figure A.5. Exemple d'interface tangible : application « Illuminating Clay ».....	147
Figure A.6. Interface interactive sur dispositifs mobiles.....	148
Figure B.1. Diagramme décrivant la phase de spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction.....	149
Figure B.2. Décomposition fonctionnelle du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".....	149
Figure B.3. Organigramme de la phase de spécification des besoins d'interaction.....	150
Figure B.4. Evolution du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".....	150

Figure D.1. Marqueurs de i-ARTtoolkit collés sur les composants du moteur de Peugeot 206.....	158
Figure D.2. Marqueurs de i-ARToolkit collés sur des composants attachés à la culasse.....	159
Figure D.3. Quelques composants de la culasse.....	160
Figure D.4. Emplacement des bougies.....	160

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Principaux facteurs affectant les performances humaines.....	12
Tableau 1.2. Problèmes liés aux manuels de maintenance.....	15
Tableau 2.1. Étude comparative de quelques méthodes de développement.....	37
Tableau 2.2. Synthèse de quelques méthodes de développement des SIM.....	53
Tableau 3.1. Intervention des acteurs dans la méthode 2TUP étendue.....	60
Tableau 3.2. Résultats des tests des trois implémentations.....	80
Tableau 3.3. Résultats des tests à travers le questionnaire adressé aux participants.....	81
Tableau 3.4. Résultats des tests, questionnaire rempli par les utilisateurs finaux ou potentiels (réparateurs).....	83
Tableau 3.5. Performances de la méthode proposée.....	85
Tableau 4.1. Taux de reconnaissance pour le marquer N°3 de taille $d=40\text{ mm}$	98
Tableau 4.2. Pannes et procédures de maintenance de la station de pompage PV.....	102
Tableau 4.3. Pannes répertoriées et leurs procédures de maintenance correspondantes (cas de deux moteurs de voiture).....	106
Tableau 4.4. Equipements utilisés dans les tests.....	113
Tableau 4.5. Questionnaire adressé aux différents sujets.....	121
Tableau B.1. Comparaison entre les deux méthodes en termes de processus.....	151
Tableau B.2. Comparaison entre les deux méthodes en termes de modèles et outils.....	151
Tableau B.3. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture MVC standard).....	152
Tableau B.4. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture MVC optimisé).....	152
Tableau B.5. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture AMF-C).....	152
Tableau B.6. Questionnaire supplémentaire pour les programmeurs.....	153
Tableau C.1. Taux de reconnaissance pour le marquer N°1, $d= 20\text{ mm}$	154
Tableau C.2. Taux de reconnaissance pour le marquer N°2, $d= 30\text{ mm}$	154
Tableau C.3. Taux de reconnaissance pour le marquer N°4, $d= 60\text{ mm}$	155
Tableau C.4. Taux de reconnaissance pour le marquer N°5, $d= 80\text{ mm}$	155
Tableau C.5. Taux de reconnaissance pour le marquer N°6, $d= 100\text{ mm}$	155
Tableau C.6. Avis des huit sujets (évaluer le taux de réussite d'une tâche).....	156
Tableau C.7. Répartition des avis des sujets (évaluer la difficulté de réaliser une tâche).....	157

Notations et abréviations

RV : Réalité Virtuelle.

RA : Réalité Augmentée.

VA : Virtualité Augmentée.

TUI : Tangible User Interface.

UI : User Interface.

RM : Réalité Mixte.

SIM: Système Interactif Mixte.

SM: Système Mixte.

SRM: Système de Réalité Mixte

SIT-RM : Système Interactif Tangible de Réalité Mixte.

HMD: Head-Mounted Display/Helmet-Mounted Display.

IHM : Interface Homme-Machine/Interaction Homme-Machine.

GL : Génie Logiciel.

UP: Unified Process.

RUP: Rational Unified Process.

2TUP : 2 Tracks Unified Process.

PM: Processus Métier.

OM: Objet Métier.

PF: Processus Fonctionnel.

OF: Objet Fonctionnel.

OI: Objet d'Interaction.

UML: Unified Modelling Language.

GOMS: Goals, Operators, Methods, and Selection rules.

UAN: User Action Notation.

MAD: Modèle Analytique de Description de l'activité/tâches.

CTT: Concur Task Tree.

K-MAD: Kernel- Modèle Analytique de Description de l'activité/tâches.

ASUR: Adapter, System, User, Real object.

IRVO: Interacting with Real and Virtual Objects.

MIM: Mixed Interaction Model/Model of Mixed Interaction.

CCU: Conception Centrée sur L'utilisateur.

UCD: User-Centred Design.

MTTR: Mean Time to Repair.

MTBF: Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement/Mean Time Between Failures.

GMAO: Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur.

SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition.

CAO: Conception Assistée par Ordinateur.

SDK: Software Development Kit.

BDD: Base De Données.

WIMP: Windows, Icons, Menus and Pointing device.

SOA: Service Oriented Architecture.

SOAP : Simple Object Access Protocol.

XML: Extensible Markup Language.

WSDL: Web Services Description Language.

HTTP: Hypertext Transfer Protocol.

UDDI: Universal Description Discovery and Integration.

SI : Systèmes d'Information

NTIC: Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.

MIT: Massachusetts Institute of Technology.

PV: photovoltaïque.

Introduction générale

Contexte industriel

Ces travaux de thèse se situent au croisement de plusieurs domaines que sont la maintenance industrielle, la réalité augmentée, la réalité mixte, l'interaction homme-système, les systèmes d'information, le génie logiciel et les sciences humaines et sociales.

L'augmentation de la cadence de production, l'évolution de la qualité des produits et services et la demande exprimée par les industriels dans le domaine de la maintenance évoquent la nécessité d'améliorer les performances des réparateurs dans le processus de maintenance ainsi que la sécurité des équipements, autant d'un point de vue matériel et environnemental qu'humain.

L'évolution de l'informatique a permis, ainsi, de doter les équipements industriels d'ordinateurs assez puissants pour apporter aux réparateurs une quantité d'information substantielle non négligeable. Ces systèmes sont utilisés pour permettre une progression dans des environnements parfois complexes et hostiles. Dans ce cadre, plusieurs sociétés industrielles se sont investies afin de permettre aux opérateurs de maintenance d'accéder aux informations nécessaires à leurs interventions en les mettant dans un cadre favorable de travail (coopération avec plusieurs travailleurs, sécurité, accès à l'information en temps réel).

Malgré ces évolutions, des problèmes persistent à nos jours. Certains industries (exemple : industrie automobile) et secteurs (exemple : secteur socio-économique) évoquent des difficultés rencontrées par des techniciens pour mener à bien leurs tâches de maintenance.

D'un point de vue socio-économique, nous avons constaté, dans plusieurs régions du Sahara algérien, comme par exemple Adrar [44], Bechar et Tamanrasset [32], des difficultés pour assurer en permanence le fonctionnement des systèmes de pompage photovoltaïque. Le véritable problème consiste à fournir un service de maintenance disponible, réactif et efficace pour assurer la continuité de fonctionnement de ces installations. Nous avons remarqué, pour certains cas, l'absence de techniciens pour rétablir le système de pompage. Pour d'autres cas, les techniciens disponibles sur le site manquent suffisamment d'expériences. Les spécificités de l'environnement (zones très éloignées, désert, vents de sable, etc.) rendent, elles aussi, le déplacement des réparateurs expérimentés et/ou des experts très difficile. En outre, les réparateurs utilisent souvent des supports papiers et des descriptions textuelles pour accéder aux informations concernant l'historique des interventions, les procédures de maintenance, la documentation, etc. Cette pratique est souvent longue et fastidieuse, surtout lorsque l'intervenant doit agir rapidement pour rétablir le fonctionnement de l'équipement. Par exemple, le technicien n'arrive souvent pas à deviner à quel moment il faut remplacer les enroulements du moteur à l'intérieur du groupe motopompe pour éviter sa détérioration et l'arrêt complet du système de pompage. Nous pouvons constater, aussi, que les solutions de maintenance proposées sont souvent dépourvues de tout encadrement, de structure d'accompagnement ou de suivi. De plus, nous remarquons un manque flagrant d'un service informatique performant pour la gestion du processus de maintenance sur site.

D'un point de vue industriel, le secteur de l'automobile évoque, jusqu'à présent, des difficultés rencontrées par des techniciens et des formateurs dans les conditions actuelles de maintenance automobile. Par exemple, il a été constaté, pour réaliser une tâche de réparation, une mauvaise visibilité de certaines pièces, une méconnaissance de leur emplacement, des incertitudes des mécaniciens quant aux opérations à réaliser et aux trajectoires de montage / démontage [5].

Une des principales directions pour pallier aux différentes contraintes dans l'activité des opérateurs de maintenance, que ce soit pour les techniciens ou pour les experts, est l'introduction de nouvelles technologiques d'aide : la "Réalité Augmentée/Réalité Mixte (RA/RM)", les systèmes interactifs et les technologies de communication. Ces technologies constituent des moyens d'assistance qui peuvent être mis à la disposition des réparateurs.

Cependant, à cause du caractère novateur de ces technologies, les intérêts et les utilisations possibles dans le domaine de la maintenance étaient initialement peu définis par les industriels et secteurs socio-économiques. Dans ce sens, plusieurs études peuvent être formulées : aide à la formation, aide au diagnostic, aide au suivi de procédures, etc.

Constat

Plusieurs industries manifestent un intérêt croissant pour la résolution des problèmes de maintenance via une assistance technologique au moyen de la réalité augmentée/réalité mixte et des technologies de communication. Dans ce contexte, plusieurs solutions sont envisageables visant à développer des plateformes plus évoluées, en proposant des environnements logiciels très riches et une mise à jour en "temps réel" de nombreuses informations.

La réalité augmentée/réalité mixte sert à la fois à faciliter l'accès aux informations nécessaires à la réalisation d'une tâche de maintenance (visualiser les procédures de maintenance, sélectionner les outils de réparation, les pièces de rechange, etc.) pour l'opérateur expérimenté d'une part, et, d'autre part, elle peut constituer un outil de formation et d'apprentissage pour l'opérateur inexpérimenté. De plus, les technologies de communication permettent de fournir un moyen d'assistance aux réparateurs par l'intermédiaire d'une expertise distante, et ceci, avec l'émergence de la télémaintenance et de la e-maintenance.

Parallèlement, plusieurs travaux dans le domaine de l'Interaction et de l'Interface Homme-Machine visent à sortir l'ordinateur de son cadre d'utilisation habituel, à savoir, l'écran, le clavier et la souris posés sur un bureau, pour laisser une part de plus en plus grande à l'interaction avec l'environnement physique de l'utilisateur, c'est-à-dire le monde réel, et ceci par le moyen de la réalité augmentée/réalité mixte (RA/RM). Cette démarche nous offre une opportunité pour le développement des systèmes d'aide à la maintenance plus évolués.

Ainsi, l'adoption par les industriels d'un nouveau service de maintenance ne peut être effective que s'il est intégré dans le système d'information de l'entreprise. Aussi, les industriels exigent des outils d'assistance qui répondent aux attentes des opérateurs du point de vue cognitif, émotionnel, sociale, etc. Dans notre étude, les aspects tels que l'utilisabilité et l'ergonomie constituent un centre d'intérêt non négligeable pour développer un moyen d'assistance efficace et commercialisable.

Problématique

Nos travaux de recherche ont trait à la conception et à la réalisation de systèmes interactifs pour l'aide à la maintenance industrielle en se basant sur le paradigme de la réalité augmentée/réalité mixte et des technologies de communication. Nos travaux sont pluridisciplinaires et s'inscrivent, principalement, dans deux domaines de recherche : la gestion de la maintenance assistée par ordinateur et l'Interaction Homme-Machine.

Les performances de l'activité de maintenance jouent un rôle prépondérant pour évaluer les performances globales de l'entreprise en termes de qualité des produits et services. La génération des solutions de gestion de maintenance pour de tels problèmes est un domaine prometteur mais qui reste en dessous des attentes des industriels. En effet, la majorité des techniques de génération de solutions ne fournissent pas des outils adaptés aux attentes des réparateurs. D'autre part, il est difficile de formaliser la notion de procédures de maintenance sous forme visuelle au sens de l'œil humain et ceci pour les raisons suivantes :

- Un opérateur peut réparer la machine s'il arrive à imaginer l'emplacement des composants et localiser le lieu de réparation. Ceci n'est pas toujours évident ;
- Les niveaux de connaissance et d'expérience des réparateurs sont très différents ;
- Les caractéristiques de certains modules et/ou composants d'un équipement sont variables et hétérogènes : composant trop petit ou trop grand, emplacement complexe et dangereux, hétérogénéités des modules (mécanique, électronique, hydraulique,...).

Dans ce contexte, l'utilisation des techniques de réalité augmentée/réalité mixte est très pertinente, car elles permettent, par exemple, à l'utilisateur de visualiser les procédures de maintenance et de sélectionner rapidement les outils de réparation et les pièces de rechange qui lui semblent adéquats à son intervention.

La sélection peut se faire d'une manière intuitive, via l'utilisation d'interfaces naturelles ou pseudo-naturelles (reconnaissance de gestes, techniques d'interaction 3D, etc.) dans une configuration immersive ou par un simple clic de souris (configuration de bureau).

L'avantage de la configuration immersive (visualisation sur dispositif mobile, grand écran, casque de visualisation stéréo ou optique) est qu'elle permet à plusieurs personnes de participer à la séance de maintenance et donc de pouvoir prendre collectivement des décisions.

D'autre part, la représentation virtuelle des procédures de maintenance, peut être modifiée, mise à jour, enrichies à des échelles variables. Ces représentations intermédiaires offrent le choix d'évaluer un plus grand nombre de possibilités de solutions de maintenance afin d'être compréhensibles par les acteurs multidisciplinaires impliqués dans l'intervention, dont le client final éventuellement.

D'une manière générale, la réalité augmentée/réalité mixte permet à l'industriel d'avoir une diversité et une souplesse dans l'activité de maintenance, mais également un gain en temps et en coût, de la conception d'un produit fini jusqu'à sa commercialisation. De plus, ce paradigme contribue dans la formation des opérateurs, à enrichir leurs connaissances et à améliorer leurs capacités cognitives.

Enfin, nous avons trouvé que les techniques de réalité augmentée/réalité mixte et les technologies de communication sont relativement utilisées dans la maintenance [61]. Néanmoins, ils n'existent pas de méthodes permettant d'adapter les solutions développées aux objectifs de la maintenance et au contexte de l'entreprise. Ce qui les rend rarement exploitables dans l'industrie. Dans ce cadre, un effort supplémentaire reste à entreprendre pour fournir des systèmes d'aide qui peuvent être intégrés dans le système d'information de l'entreprise et ainsi utilisables par tous les acteurs impliqués dans le processus de gestion de maintenance.

Objectifs et contributions

L'objectif essentiel de notre travail est, donc, de réaliser des systèmes interactifs mobiles combinant des entités du monde réel et du monde virtuel pour l'aide à la maintenance industrielle et ce, en répondant aux besoins des opérateurs et au contexte de l'entreprise. Pour ce faire, nous proposons une méthodologie permettant d'intégrer les systèmes interactifs que nous développons dans le processus de gestion de maintenance de l'entreprise.

Dans ce but nous visons les objectifs intermédiaires suivants :

- Etudier et explorer les possibilités offertes aux opérateurs en termes d'aide à la maintenance ;
- Comprendre et structurer l'espace des possibilités des systèmes de réalité augmentée/réalité mixte combinant des entités du monde réel et du monde virtuel et analyser les spécificités des systèmes de réalité mixte. Un intérêt sera accordé aux pratiques d'interaction homme-machine et homme-système (multi-modalité, interaction 3D, etc.) ;
- Centrer le cadre de conception et de développement sur les préoccupations et les attentes des opérateurs de maintenance. Il s'agit d'intégrer ces utilisateurs dans le processus de conception afin de leur fournir une interface interactive facile à utiliser.
- Proposer des solutions conceptuelles en termes de processus, langages, modèles et outils afin d'intégrer les pratiques et modèles d'interaction homme-machine dans une méthode de développement ;
- Proposer une méthodologie de développement pour les systèmes de réalité mixte et les interfaces classiques : (1) répondant aux besoins fonctionnels des utilisateurs ; (2) utilisables d'un point de vue ergonomique ; (3) Intégrable dans le système d'information de l'entreprise. Nous appliquons cette méthodologie dans le cadre de l'aide à la maintenance;
- Développer un système interactif tangible de réalité mixte pour l'aide à la maintenance permettant de faciliter l'accès et la manipulation de certaines informations lors de l'activité de réparation. Il s'agit de développer une solution permettant à l'opérateur, à partir d'un flux vidéo, de visualiser, d'interagir, et de construire un environnement virtuel 2D/3D en temps réel. Cet environnement doit être en adéquation avec la position de l'opérateur.
- Fournir un outil d'interaction et d'immersion, le plus naturel possible, pour faciliter le déroulement de l'activité de maintenance ;
- Développer plusieurs types d'interfaces interactives adaptés aux types de dispositifs utilisés et au profil des réparateurs engagés dans l'activité de maintenance ;
- Appliquer la méthode proposée et les outils développés aux cas de la maintenance d'un système de pompe photovoltaïque et de la maintenance des moteurs de voitures ;

- Effectuer une étude d'évaluation du système interactif proposé et des interfaces interactives développées.

Organisation de la thèse

Nous avons organisé ce travail de thèse en deux grandes parties :

La première partie décrit l'enjeu des nouvelles technologies dans l'amélioration des performances de la maintenance dans un contexte industriel. Cette partie présente également des méthodes et des approches pour le développement de systèmes interactifs et l'intégration des nouvelles technologies dans le monde industriel.

Le chapitre 1 aborde un état de l'art sur les systèmes d'aide à la maintenance, les systèmes interactifs et les nouveaux paradigmes d'interaction tels que la réalité augmentée et la réalité mixte. Des applications dans le domaine de la maintenance utilisant les systèmes interactifs sont, également, présentées.

Le chapitre 2 présente une synthèse des méthodes de développement des systèmes interactifs et des systèmes de réalité mixte. Une discussion, en termes d'apports et de limites de ces méthodes a été également abordée.

La deuxième partie est dédiée à nos contributions.

Dans le **chapitre 3**, nous proposons une méthodologie pour le développement de systèmes de réalité mixte pour l'aide à la maintenance industrielle, ceci, en se basant sur l'étude bibliographique, des différentes méthodes de développement, effectuée dans la première partie. En effet, nous proposons une extension de la méthode 2TUP pour introduire les propriétés des systèmes interactifs et de la réalité mixte dans le contexte de la maintenance. Cette démarche d'extension permet d'intégrer les propriétés des technologies émergentes dans le système d'information de l'entreprise afin d'être exploitées par les opérateurs de différents niveaux d'expertise.

Dans le **chapitre 4**, nous développons, d'un point de vue pratique, un système interactif tangible basé sur la réalité mixte. Nous développons, par la suite, des interfaces interactives multimodales et mobiles permettant aux réparateurs à partir d'un flux vidéo de visualiser et d'interagir avec les modèles 2D/3D des procédures de maintenance recalés directement sur son environnement de travail. Une solution de maintenance coopérative est, ensuite, mise en œuvre. Elle offre aux réparateurs (techniciens et experts en maintenance), via un réseau de communication, la possibilité d'échanger et de partager plusieurs types d'informations : représentations 2D/3D, messagerie, communication vocale, etc. Enfin, une phase expérimentale de notre travail est abordée. En effet, le système interactif que nous réalisons est expérimenté sur deux cas d'étude : maintenance d'une station de pompage photovoltaïque et maintenance de moteurs de voiture. Une évaluation expérimentale est, par la suite, réalisée avec un échantillon de réparateurs utilisant ce système.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale où nous dressons un bilan de nos travaux ainsi que nos contributions autant sur le plan scientifique que technologique.

Afin de compléter ce document, des annexes ont été fournies.

L'**annexe A** présente, dans sa première partie, quelques notions sur les systèmes interactifs et les technologies de communication. Dans la deuxième partie, quelques projets et applications récentes de systèmes interactifs mixtes ont été présentés. Nous nous focalisons sur les systèmes interactifs que nous avons développés dans notre laboratoire.

L'**annexe B** introduit des concepts et pratiques de notre méthode de développement des systèmes de réalité mixte. Des résultats d'évaluation de la méthode proposée ont été également présentés.

L'**annexe C** montre différentes expérimentations de la phase évaluation.

L'**annexe D** décrit les composants d'un équipement (moteur d'une voiture) avec lequel nous avons réalisé une partie de nos expérimentations.

Première partie
Etat de l'art

Chapitre I La maintenance industrielle et les technologies émergentes

I.1 Introduction

Dans un contexte industriel de plus en plus concurrentiel, où l'évolution de la technologie, les nouvelles préoccupations sociétales et environnementales viennent toutes s'ajouter à la finalité économique. La maîtrise de la performance des processus de production est un enjeu capital pour améliorer la performance globale des entreprises. Un levier d'action sur cette maîtrise, principalement pendant la phase d'exploitation, est le processus de maintenance qui joue un rôle prépondérant pour réduire la dégradation des performances de ces systèmes.

Au cours de ces dernières décennies, la fonction "maintenance" est devenue "la réponse" au besoin de maîtriser techniquement et économiquement des systèmes de production dans un environnement de plus en plus automatisé. Cette fonction s'est étendue à toutes les industries et s'est répandue même dans les services. Cette expansion s'explique par la croissance des coûts des pannes et leurs conséquences sur les systèmes de production de plus en plus complexes et sophistiqués. La maintenance participe aux résultats finaux de l'entreprise et devient une des fonctions essentielles dans un système de production. Elle est passée du centre de coûts au centre de profit et participe à la compétitivité de l'entreprise dans un milieu concurrent.

Dans ce cadre, un processus d'aide à la maintenance efficace semble inéluctable pour permettre aux opérateurs, que ce soit un technicien ou un expert, d'exécuter les actions de maintenance en augmentant le gain en termes de disponibilité, de productivité, de qualité, etc.

Pour répondre à cette problématique, les systèmes interactifs ont évolué afin d'offrir à l'ensemble des opérateurs des systèmes efficaces, dans une grande variété de situations et pour différentes activités. Le recours aux systèmes interactifs, dépassant l'informatique de bureau, utilisant plusieurs médias et offrant un accès permanent aux réseaux de communications, a nécessité l'émergence de nouvelles formes d'interaction (réalité augmentée, réalité mixte, interfaces tangibles,...). La quantité et l'hétérogénéité de l'information accessible aux utilisateurs font que les traditionnels systèmes interactifs ne sont plus suffisants pour la gestion efficace des processus de maintenance dans l'entreprise actuelle.

Ce chapitre a pour but de présenter les différentes avancées qui ont favorisé l'émergence de systèmes interactifs ainsi que leurs utilisations dans le contexte de la maintenance. Et dont l'objectif est aussi de définir les enjeux relatifs à l'assistance à la maintenance dans un processus de production industriel et utilisant les technologies émergentes.

I.2 La maintenance dans un contexte industriel

I.2.1 Notions fondamentales

La démarche de maintenance dans un environnement industriel s'appuie sur des notions de base. Parcourir ce vocabulaire de base est donc une introduction classique à la fonction "maintenance".

Maintenance : ensemble de toutes actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destiné à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction ou la tâche requise [3]. Dans [153], la fonction maintenance est présentée comme un ensemble d'activités regroupées en deux sous-ensembles : les activités à dominante technique et les activités à dominante gestion.

Un bien : tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement.

Défaillance : cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise. La défaillance peut être vue comme l'évènement faisant basculer un bien dans un état de panne. Les raisons en sont nombreuses, pouvant être dues à la fabrication, à la conception ou encore à l'usure [41].

Dégradation : c'est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien, liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe.

Panne : c'est l'incapacité d'un dispositif à accomplir une fonction requise.

Maintenir : c'est donc **dépanner** ou **réparer** un appareil afin d'assurer la continuité de la production. C'est, en outre, choisir les moyens de **prévenir**, de **corriger** ou de **renover** le matériel selon son usage afin d'optimiser le coût global de la production. Dans la définition de la maintenance, nous trouvons deux mots-clés : **maintenir** et **rétablir**. Le premier fait référence à une action préventive tandis que le deuxième fait référence à une action corrective (cf. Figure 1.1).

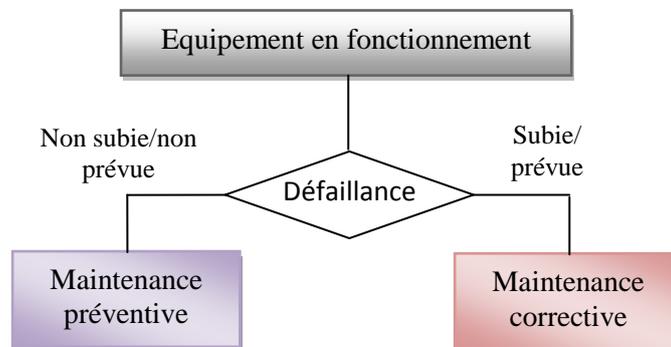


Figure 1.1 Types de maintenance [154].

Maintenabilité (Maintenability) : la norme AFNOR X 60-500 [2] définit la maintenabilité comme étant l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné, dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits.

Disponibilité : la norme AFNOR X 60-500 [2] définit la disponibilité comme l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires de maintenance soit assurée.

Sécurité : c'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques [176].

Pour compléter ces définitions, de nombreux auteurs présentent différentes catégories de maintenance industrielle. Komonen [115] utilise une division des activités de maintenance en deux catégories, la maintenance d'après –casse et la maintenance planifiée. Certains auteurs comme dans [83] et [118] définissent les tâches de maintenance sous trois angles différents : corrective, préventive et prédictive. Rasovska dans [146] décrit la maintenance proactive et améliorative en plus de la maintenance corrective et préventive.

L'objectif ici n'étant pas d'établir, de façon exhaustive, les différents types de maintenance, le lecteur pourra se rapporter, par exemple, à [3] et [146] où des notions de base de la maintenance sont traitées de façon plus détaillée.

I.2.2 Système d'information et système informatique en maintenance

Un système d'information, est un système, automatisé ou manuel, qui comprend des hommes, des machines et des méthodes organisés pour assembler, transmettre et répandre des données qui représentent de l'information pour les utilisateurs [146].

Un système informatique, considéré comme une partie automatisée du système d'information, regroupent les applications de gestion et ses éléments d'accompagnement, les logiciels supports et le matériel. Les systèmes informatiques en maintenance industrielle sont caractérisés par la gestion et le traitement des informations dans les différentes phases du processus de maintenance [146].

I.2.3 Processus de maintenance

Un processus de maintenance, selon [170], est un enchaînement d'activités contrôlées ou interactives. Aussi, Rasovska [146] définit le processus de maintenance comme une suite logique et récurrente d'opérations techniques et de gestion. Selon le même auteur, le processus de maintenance se divise en un ensemble d'activités. Parmi ces activités, nous citons :

1. Le **déclenchement** représente une signalisation souvent automatique d'un problème (défaillance ou panne). Ceci se traduit par une requête appelée demande d'intervention. La requête peut être déclenchée par le client, par le système de gestion des interventions préventives dans la GMAO ou par les capteurs ou plus généralement par le système de surveillance comme le SCADA.
2. La **planification et le lancement** consécutif de l'intervention se font suivant la disponibilité de l'opérateur dont les compétences sont nécessaires pour effectuer cette intervention (les compétences sont identifiées en fonction du type d'intervention), et suivant le planning de la production et donc de la disponibilité de l'équipement.
3. **L'ordonnancement et l'approvisionnement**. Les outils et les pièces de rechange nécessaires pour la réalisation de l'intervention sont identifiés dans l'ordre de travail et peuvent être commandés si nécessaire auprès des fournisseurs. Suivant le délai d'approvisionnement, la date d'intervention peut être re-planifiée.
4. Le **diagnostic et l'expertise** de panne sur l'équipement concernent la localisation et l'identification de la cause ainsi que les actions conduisant à sa réparation.
5. **L'intervention** représente une action de réparation de l'équipement en panne dans la maintenance corrective, une action de l'entretien de l'équipement dans la maintenance préventive et proactive. Après avoir effectué l'intervention sur l'équipement donné, l'opérateur de maintenance remplit obligatoirement le rapport d'intervention. Ce dernier est un moyen nécessaire pour capitaliser les connaissances des réparateurs.

I.2.3.1 Données utilisées dans un processus de maintenance

Dans le cadre de la maintenance d'équipements, plusieurs données sont mises en jeu. Elles peuvent être des données financières, des données concernant les opérateurs, les équipements, les pièces, les outils de réparation, les procédures de maintenance, le diagnostic, etc.

D'autres types de données peuvent être recensées telles que les **données de fonctionnement** qui représentent un ensemble d'informations sur l'état des équipements et composants, d'unités, des sous-ensembles, d'une chaîne de production, etc. Les données de fonctionnement sont nécessaires afin de permettre d'évaluer l'état de la situation (équipement en panne ou en dégradation) et ensuite d'élaborer des propositions d'actions d'intervention.

Les différentes données peuvent être structurées sous forme de modules intelligents [146] qui peuvent être intégrés dans une plateforme globale de maintenance. Nous citons parmi ces modules, le module diagnostic, le module pronostic, le module de surveillance SCADA, le module de gestion de documentation, le module GMAO, etc.

D'autre part, les différentes données sont intégrées dans un système informatique et ceci dans le cadre de l'informatisation et l'automatisation de la gestion des entreprises. Des fichiers informatiques des équipements, des interventions, des stocks, des plans et schémas etc. ont ainsi été créés. L'intégration de ces fichiers et l'automatisation des activités de la maintenance ont été rendues possibles grâce aux progiciels de GMAO. Ainsi, les événements quotidiens de la maintenance sont traités : la panne, l'exécution de la maintenance préventive, la gestion des stocks, etc.

I.2.3.2 Acteurs impliqués dans un processus de maintenance

Afin de mieux planifier l'activité de maintenance, il est nécessaire d'identifier qui a besoin de quoi, quand et comment. Dans [146], trois classes d'acteurs ont été proposées : **opérateur de maintenance**, **expert en maintenance** et **superviseur**.

(a) Opérateur de maintenance

Appelé aussi « technicien », il représente le spécialiste qui intervient directement sur un équipement. Dans le cas de la maintenance préventive, il s'agit de l'entretien ou de changement préventif. Dans le cas de la maintenance corrective, l'opérateur réalise le diagnostic et la réparation sur un équipement. L'opérateur est donc responsable de la performance de l'intervention. En outre, il est chargé d'établir des rapports d'intervention. Pour assurer une intervention efficace, l'opérateur de maintenance utilise des informations supplémentaires comme la documentation technique des équipements, les rapports d'intervention antérieurs, des données concernant l'état des équipements, des mesures du système de surveillance, etc.

(b) Expert en maintenance

L'expert en maintenance (appelé également réparateur spécialisé) intervient aussi bien dans la phase d'intervention (aide locale ou distante au diagnostic et à la réparation) comme étant l'expert dans un domaine spécifique. Dans ce cas, il est chargé d'analyser l'équipement et de prendre des décisions sur le choix de la stratégie de maintenance la mieux adaptée. Cet expert planifie, à la fois, les interventions préventives, propose des devis afin d'améliorer le fonctionnement ou la disponibilité de l'équipement et veille sur l'accomplissement des règles et des normes concernant la sécurité de l'équipement, du

personnel et de l'environnement. Dans certains cas, l'expert en maintenance peut jouer le rôle d'un opérateur de maintenance.

(c) Le superviseur

Il n'intervient pas dans les phases techniques du processus de maintenance mais il supervise la réalisation et effectue le suivi du contrat de maintenance sur le site de production. Il est aussi responsable de ce contrat et du suivi des engagements envers les clients.

I.2.4 Architectures des systèmes de maintenance

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont permis la migration des différents systèmes informatiques autonomes vers un système intégré. Cette démarche a entraîné l'évolution de l'activité de maintenance avec l'apparition de plusieurs architectures et systèmes informatiques [146]. Ces architectures ont été classifiées, d'une part, en fonction de la complexité et du niveau de structuration de l'information partagée, et d'autre part en fonction de l'intensité de la relation entre les applications intégrées dans ces architectures. Les architectures proposées sont classifiées comme suit [146]:

Architecture d'un système de **maintenance** comprend un seul système informatique présent sur le site de production et utilisé sur le site de maintenance. Ce système est autonome sans échange de données avec d'autres systèmes. En parallèle avec la classification des entreprises, cela correspond à l'entreprise traditionnelle, donc nous parlons d'une architecture traditionnelle d'un système d'information.

Architecture d'un système de **télémaintenance** est constituée d'au moins de deux systèmes informatiques, un émetteur et un récepteur de données et d'informations qui s'échangent à distance. Selon la définition d'AFNOR, la télémaintenance est la maintenance d'un bien exécutée sans accès physique du personnel au bien [3]. Il s'agit donc d'une architecture distribuée, basée sur la notion de distance qui permet de transférer les données par une ligne téléphonique ou par l'intermédiaire d'un réseau local.

Avec l'extension d'Internet, les systèmes de télémaintenance émergent vers le concept d'**e-maintenance**. L'architecture d'un système d'e-maintenance sera implémentée sur une plateforme distribuée et coopérative intégrant différents systèmes et applications de maintenance. Cette plateforme prend appui sur le réseau mondial d'Internet (d'où le terme e-maintenance) et la technologie web. Elle permet d'échanger, de partager et de distribuer des données. Ici le concept de la maintenance intelligente peut être exploité et les stratégies de maintenance proactives et coopératives sont mises en place.

Un autre système, qui représente l'extension de systèmes d'e-maintenance à fait son apparition. Il s'agit du concept de **s-maintenance** ou l'échanges d'informations s'effectue en utilisant des connaissances et des compétences dans un contexte de web sémantique [146].

I.3 Le facteur humain dans un processus de maintenance

Dans l'industrie, le comportement de l'opérateur durant l'intervention joue un rôle prépondérant dans l'accomplissement de la tâche de maintenance dans des conditions favorables. Cependant, en pratique, l'opérateur est confronté à plusieurs facteurs le conduisant à commettre des erreurs. Dans ce cadre, plusieurs études ont été entreprises pour déterminer ces facteurs. Nous citons par exemple, les études menées par la United Kingdom Civil Aviation Authority « UKCAA » [174], Boeing [122] et Reason [147]. Plus récemment, la UKCAA [175] a effectué une étude sur le déroulement des activités de maintenance et ceci sur une période de 11 ans (1996 à 2006). Dans cette étude, trois types des erreurs ont été répertoriées (cf. Figure 1.2) [41]:

- ➔ Erreur due à une maintenance incomplète ou inachevée, soit 20,68% des erreurs.
- ➔ Erreur due à une action incorrecte de maintenance, c'est-à-dire que l'activité de maintenance est arrivée à son terme mais entachée d'omissions ou de négligences. Cela représente la moitié des erreurs, c'est-à-dire, 53,11 %.
- ➔ Erreur due à un mauvais contrôle de maintenance, soit 26,22 % des erreurs.

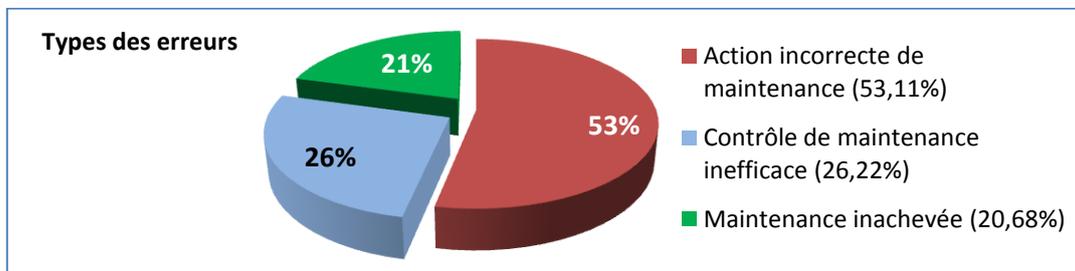


Figure 1.2. Types des erreurs dans une activité de maintenance.

Dans un autre contexte, plusieurs facteurs liés aux caractéristiques de l'homme, impliqué dans les activités de maintenance industrielle, peuvent conduire à des erreurs. Les principaux facteurs affectant les performances de l'opérateur ont été regroupés par [143] en facteurs individuels et organisationnels (cf. Tableau 1.1) [41].

Tableau 1.1. Principaux facteurs affectant les performances humaines

Facteurs individuels	Facteurs organisationnels
La santé physique, la taille et la force de l'individu etc.	Les équipements, les outils, les pièces, le manque de ressources, pas assez de personnels, etc.
Les contraintes de temps, la pression du management.	Le management de maintenance, la direction, la supervision, la politique de l'entreprise
Un évènement ou stress personnel.	Les processus de travail, les procédures, les informations, processus de communication, etc.
La distraction sur le lieu de travail.	Les objectifs incompatibles.
Le manque de conscience.	Les structures organisationnelles, l'action syndicale, etc.
Le manque de connaissances, le manque de compétences, de communication.	L'environnement.
Le manque d'affirmation et de confiance en soi.	Le manque de travail en équipe.

Dupont a proposé, aussi, dans [86] une classification des principales causes aboutissant à une erreur de maintenance : le manque de communication, la complaisance, le manque de connaissances, les distractions, le manque de travail en équipe, la fatigue, le manque de ressources, la pression, le manque d'assurance, le stress, le manque de conscience et le non respect des normes.

En Algérie, les opérateurs de maintenance rencontrent divers problèmes dans la réalisation des tâches de maintenance : absence ou perte de manuels, manque de formation des opérateurs, absence de compétences requises, complexité des équipements à maintenir, la pression, la fatigue, la précipitation, la maladresse, l'imprécision dans l'accomplissement d'une tâche, etc.

La diversité des facteurs conduisant aux erreurs, qu'ils soient liés au contexte social, à l'environnement physique ou à la psychologie de l'opérateur, nous renseignent quant à la difficulté de pouvoir éviter ces erreurs. De ce fait, un processus d'aide à la maintenance efficient semble inéluctable pour permettre aux opérateurs d'exécuter les actions de maintenance en minimisant au maximum les différentes erreurs. Ceci conduit, entre autre, à la fois à l'amélioration de la disponibilité et de la productivité de l'équipement à maintenir.

I.4 L'aide à la maintenance

Nous avons vu précédemment que l'être humain est confronté à commettre des erreurs. Certaines études ont établi les facteurs et les causes les plus probables compromettant une tâche de maintenance. Pour remédier à ce problème, l'humain a recours à toute aide ou assistance lui permettant d'effectuer son travail de manière qualitative.

Dans l'industrie moderne, l'opérateur est confronté à une complexité croissante des systèmes technologiques. Ces systèmes sont très souvent à la croisée de divers domaines tels que l'électronique, la mécanique et l'informatique. Pour un opérateur, la formation est alors un passage obligé pour acquérir de nouvelles connaissances de façon continue. Cependant, les formations génèrent un coût non négligeable et une perte de temps parfois contraignante due à l'apprentissage.

Dans ce cas, l'aide à la maintenance doit offrir les moyens nécessaires pour réaliser une tâche correctement. Selon Grosjean [96], « aider un opérateur c'est estimer qu'il risque de rencontrer des difficultés et que l'aide améliorera la réalisation de sa tâche, donc sa performance au travail. L'aide apparaît lorsque trois éléments sont réunis : une tâche, un opérateur chargé de réaliser la tâche et une aide (humaine ou technique) chargée d'assister l'opérateur dans sa tâche ».

Dans [49], l'auteur estime qu'une aide adéquate dépend principalement de trois facteurs : la pertinence des fonctionnalités (adaptation de l'aide aux objectifs de la tâche), le niveau d'utilisabilité (compatibilité de l'aide avec les caractéristiques physiques, cognitives et sociales de l'opérateur vis-à-vis de son travail) et les modes de régulation psychosociale (compromis entre les interactions humaines — aides techniques — organisation). La non-prise en compte de ces facteurs peut rendre l'aide inutile, détournée, inefficace et même rendre le travail plus complexe alors que l'objectif est de le simplifier [49]. Afin de prendre en considération cette problématique, plusieurs types d'aides ont été proposés.

I.5 Types d'aide ou d'assistance

Plusieurs types d'assistance peuvent être offertes aux réparateurs, et ceci en fonction du contexte de travail dans lequel ils évoluent. Ces types d'assistance peuvent se combiner entre eux et peuvent prendre de nombreuses formes : manuels, logiciels, assistance humaine locale ou distante, etc. Dans [41] et [46], trois types d'aides ont été répertoriés : l'aide informative, collaborative et supplétive.

L'aide informative : elle permet de donner des informations, souvent de nature procédurale, sur des problèmes posés à un utilisateur pour réaliser une tâche donnée. L'aide informative organise le champ informationnel de l'opérateur. Les supports écrits, muraux et informatiques structurent l'activité de l'opérateur dans la mesure où ils permettent une division des tâches et une organisation des procédures.

L'aide collaborative : elle consiste à faire collaborer un agent d'assistance, humain ou technique, avec un opérateur disposant de ressources limitées. L'opérateur entre en interaction avec l'assistant, qui ne se limite pas seulement à une présentation des informations, mais lui pose des questions, explique les décisions, aide au diagnostic, etc. En effet, l'assistant traite les informations estimées pertinentes et conseille l'opérateur. Ce dernier construit ensuite son raisonnement au fur et à mesure des interactions avec son assistant et opte enfin pour une décision.

L'aide supplétive : Elle remplace l'homme dans un certain nombre de tâches qu'il ne peut pas réaliser. Cette assistance est conçue pour pallier les déficiences humaines (handicaps moteurs ou sensoriels) ou l'inaccessibilité à une situation.

I.5.1 Assistance basée sur la documentation

L'aide basique que peut se procurer l'opérateur est l'aide sous forme de communication orale. L'écriture a remplacé progressivement la conversation orale permettant à l'opérateur d'archiver les procédures et d'avoir des manuels d'aide plus structurés. Nous avons eu recours à une aide de type textuelle basée sur l'utilisation de documents. Ces derniers indiquent à l'opérateur comment et où la tâche doit être effectuée. Cependant, les documents qui sont censés normaliser ces tâches ne sont pas exempts de défauts.

Une étude a été effectuée, pendant une dizaine d'années [48], pour évaluer l'utilisabilité des aides textuelles fournies aux opérateurs faiblement qualifiés dans une dizaine d'entreprises couvrant divers domaines. Les résultats des évaluations nous ont conduits aux conclusions suivantes :

- 56,9 % des documents ne possèdent pas une bonne visibilité.
- 43,4 % des documents contiennent des abréviations et des sigles inexpliqués.
- 76,7 % des documents contiennent des phrases courtes.
- 58,9 % des documents contiennent des phrases grammaticalement mal construites.
- 17,6 % des documents expliquent convenablement les actions à réaliser.

David Novick a également effectué une étude pour déterminer les causes qui ont conduit les utilisateurs à être réticents à l'égard de l'utilisation des documents [136], [137]. Il a constaté que les manuels sont considérés trop lourds, encombrants et donc difficilement utilisables. Les utilisateurs préfèrent les systèmes informatiques pour chercher l'information dont ils ont besoin, avant de

l'imprimer sur papier. Enfin, Novick signale le niveau de frustration que provoque l'utilisation d'une aide, tant informatique que physique (papier). Essentiellement, la difficulté provient lors de la lecture et de l'exécution des instructions en même temps. Il est à noter que ceci est à relier au fait que les opérateurs préfèrent imprimer des pages qui par la suite pourraient être facilement positionnées, attachées, scotchées sur le lieu de la tâche.

Dans l'industrie, les manuels de maintenance sont en général fournis par les constructeurs. Ces manuels suivent en général des règles imposées (ou recommandées). Néanmoins, les opérateurs de maintenance ne respectent pas forcément ces règles [88]. Ceci représente l'un des facteurs contribuant à l'apparition d'incidents.

Enfin, il est intéressant de remarquer, selon l'étude effectuée par [88] que 70 % des opérateurs préfèrent compter sur leurs propres connaissances et compétences, à cela, si l'on y ajoute les 70 % des opérateurs qui supposent connaître les contenus des manuels. Nous pouvons comprendre pourquoi les opérateurs se désintéressent de l'utilisation de la documentation.

Dans [60], une étude de la pertinence des manuels de maintenance a été effectuée. Les résultats ont montré que les manuels ne sont pas forcément appropriés aux activités de maintenance et présentent des imprécisions, des ambiguïtés et un manque d'information. Les principaux résultats sont présentés dans le tableau 1.2 [41]:

Tableau 1.2. Problèmes liés aux manuels de maintenance

	Jamais	Rarement	Occasionnellement	Souvent	Très souvent
Pourcentage de fréquence dans l'année où un opérateur a réalisé un travail d'une meilleure manière que celle proposée par le manuel	13%	25%	40%	16%	6%
Procédure ambiguë imprécise ou incomplète ayant entraîné une pièce endommagée	38%	44%	14%	-	-
Consulter d'autre(s) opérateur(s) face à une procédure ambiguë, imprécise ou incomplète	-	12%	23%	41%	18%
Réaliser la tâche avec ses propres connaissances face à une procédure ambiguë ou incomplète	12%	23%	41%	18%	-
Fréquence des problèmes dans les manuels rapportés	3%	21%	30%	31%	15%

D'une manière générale, la documentation mise à disposition des opérateurs présente de nombreux défauts : inaccessibilité, imprécision, procédures non appropriées, mauvaise organisation, etc. Ces défauts incitent l'opérateur à ne pas suivre les procédures officielles, préférant ainsi utiliser d'autres outils, parfois utiles et intéressants, mais peuvent conduire à l'échec.

I.5.2 Assistance basée sur la conversation téléphonique

Les opérateurs peuvent recourir à une assistance téléphonique pour réaliser une opération de maintenance. Bien qu'il existe à l'heure actuelle plusieurs outils de communication à distance (courriel, forum, chat...), le téléphone permet aux interlocuteurs de véhiculer de l'information riche, et ce, de manière synchrone.

Toutefois, l'assistance téléphonique entre un expert et un novice n'est pas sans difficulté, certaines informations ne peuvent être transcrites qu'à travers le canal visuel. Dans [82], il a été observé qu'il est possible d'atteindre au téléphone un niveau de performance équivalent à une communication face à face moyennant un grand effort verbal de la part des interlocuteurs. Ces difficultés liées à la communication dépendent de la capacité des communicants à faire coïncider leur savoir, adapter leur vocabulaire et à se faire une représentation mentale de la situation.

L'usage et l'efficacité des aides téléphoniques chez les opérateurs dépendent alors de plusieurs paramètres :

- Les débutants se penche vers l'assistance téléphonique, les expérimentés privilégiant l'aide écrite.
- Les techniciens ont recours à l'assistance téléphonique pour réduire le temps d'intervention et ceci lorsque ils sont face à un client important.
- Plus l'aide se présente comme étant discrète vis-à-vis de la hiérarchie ou des collègues, plus son usage est privilégié.

Même si l'assistance téléphonique apparaît comme un moyen de communication à distance efficace dans le domaine de la maintenance industrielle, nous venons de voir qu'elle présente des défauts, le plus souvent liés à la perte d'autonomie de l'appelant ou à la mauvaise description à distance du problème à résoudre.

I.5.3 Les technologies émergentes et tendance dans la maintenance

Les premières utilisations des technologies émergentes dans la maintenance datent du début des années 90. Cependant, leur concrétisation réelle ne s'est réalisée qu'au début des années 2000 avec l'émergence des nouveaux paradigmes d'interaction tels que la réalité augmentée, les interfaces tangibles, l'informatique ubiquitaire, etc. La vocation de ces technologies émergentes devient de plus en plus apparente. Il s'agit d'accompagner un opérateur dans l'accomplissement de sa tâche en fournissant de l'information contextualisée et interactive, et ceci, en temps réel. De plus, l'évolution des technologies de communication et l'apparition d'Internet ont offert à l'opérateur la possibilité d'être guidé et formé à distance par des experts pour la réalisation de sa tâche.

Les apports les plus couramment cités peuvent être réunis dans les deux groupes suivants: intérêts pour la tâche et intérêts pour l'opérateur [41].

I.5.3.1 Intérêt des technologies émergentes pour la tâche de maintenance

Les technologies émergentes, particulièrement la réalité augmentée, permettent à l'opérateur de bénéficier de plusieurs avantages qui sont énumérés comme suit :

- Avoir des données contextualisées et en temps réel [131], ou accéder à des informations sur de précédentes séquences de réparation [103]. L'information est ciblée, l'opérateur n'a plus besoin de gérer et d'exploiter lui-même la quantité d'information [185].

- Réduire le nombre d'erreurs [185]. Selon Marsot [120], ce n'est pas le passage d'un support papier à une application informatique qui améliore le taux de réussite d'une tâche, mais c'est l'utilisation des technologies émergentes (ex. réalité augmentée) qui améliore le taux de réussite.
- Réduire le temps de transition entre les tâches et sous-tâches. Ceci entraîne la réduction du temps total pour l'accomplissement des tâches [105]. Les technologies émergentes peuvent fournir des indications permettant à l'opérateur de localiser précisément le lieu de l'intervention et d'exécuter plus facilement sa tâche.
- Les technologies émergentes permettent de réaliser plus rapidement et d'une façon efficace des procédures de maintenance, comparativement à un guidage papier [185].

I.5.3.2 Intérêt des technologies émergentes pour l'opérateur de maintenance

Les nouveaux paradigmes d'interaction permettent à l'opérateur de :

- Réduire les mouvements oculaires et de sa tête [103]. Grâce à l'utilisation des casques de visualisation "Video-See-Through", l'opérateur peut avoir des informations directement sous les yeux et peut être guidé directement sur le lieu d'intervention. Moins de mouvement, donc potentiellement une réduction des troubles musculo-squelettiques [105].
- Réduire les changements liés au passage d'une activité à une autre (ex. chercher une information pour réaliser une tâche). L'opérateur peut se concentrer sur ce qu'il est entrain de faire sans « distraction » [103]. Ceci limite d'avantage sa charge mentale [172] (effort de transposition, de concentration, etc.).
- Minimiser l'utilisation du support papier pour faciliter l'usage de ses deux mains pour les tâches qui l'exigent [164], [178].
- Se former et augmenter ses capacités d'apprentissage. Par exemple, la réalité augmentée qui permet d'augmenter la scène réelle par des données 3D assure une meilleure compréhension des concepts théoriques [168], facilite l'élaboration de représentations des relations spatiales, et de leur évolution temporelle [164].

I.6. Technologies émergentes : systèmes interactifs et nouveaux paradigmes d'interaction

I.6.1 Systèmes interactifs

Un système interactif est une application qui communique avec un utilisateur (cf. Figure 1.3). Les échanges s'effectuent grâce à une Interface Homme-Machine (IHM) qui prend en charge les éléments suivants [160]:

- ➔ La communication de l'utilisateur humain vers le noyau fonctionnel du système (entrée d'information),
- ➔ La communication du noyau fonctionnel vers l'utilisateur humain (sortie d'information),
- ➔ La traduction entre les variables informatiques du monde de l'application et celles psychologiques et/ou réelles de l'utilisateur.

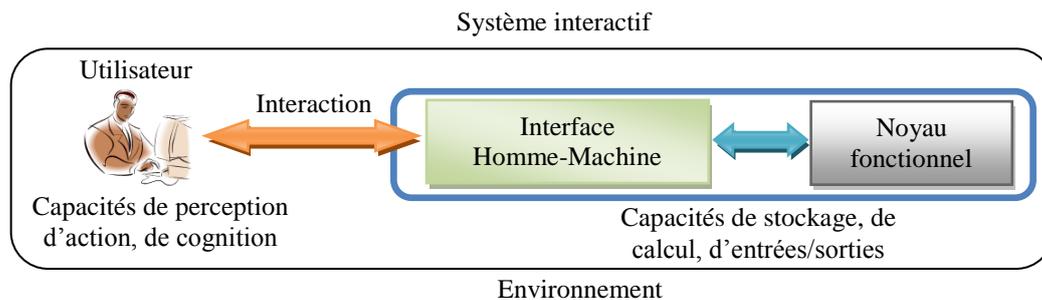


Figure 1.3 Schéma de principe d'un système interactif.

I.6.2 Evolution des systèmes interactifs

Selon l'étude effectuée dans [64], les premières recherches en IHM ont commencé avec les travaux d'Ivan Sutherland [171] qui a développé la première interface graphique en 1963 au MIT Lincoln Laboratory. Il a également réalisé le premier système « SketchPad » qui utilise un écran cathodique (oscilloscope) et un stylo optique pour l'édition graphique de dessins techniques. Une année après, Douglas Engelbart a développé la première souris (cf. Figure 1.4).

Dés le début des années 70, avec l'apparition des ordinateurs modernes, Alan Kay a proposé le langage « Smalltalk » et son environnement de programmation graphique, dans le but de fournir à l'utilisateur des outils pour construire son propre environnement. En 1973, Palo Alto a proposé la première station de travail personnelle (PC) à écran graphique contenant des fenêtres, des menus, des barres de défilement, ... manipulés par une souris. Cette station permet d'effectuer des opérations telles que l'édition de textes et l'envoi de courriers électroniques. Une année plus tard, Charles Simonyi introduit l'éditeur de texte Microsoft Word.

Pour améliorer les performances des IHM, un projet prometteur « Star » a été lancé en 1975. Il a débouché sur un système « Xerox PARC » en 1981. Ce projet a fourni la première machine avec des fenêtres qui se superposent et une interface graphique basée sur la métaphore de bureau et ceci avec des icônes représentant des documents et des ressources. Notons aussi l'apparition de souris à deux boutons et de claviers munis de deux pavés de touches de fonctions.

Trois ans après, Apple a mis en place, avec Macintosh, une interface graphique contenant une barre de menu et des boîtes de dialogue. Dans la même période, des travaux engagés au MIT sont soldés par l'apparition de la première version de Windows 1.01 en 1987. Depuis, cette version a connu des améliorations, à savoir Windows 2.03 en 1988, Windows 3.0 en 1990, Windows 3.1 en 1992, Windows 95, Windows 98, Windows 2000, Windows XP, Windows Vista, Windows 7 et récemment Windows 8.1.

Depuis les années 90, des recherches dans le domaine du Web ont connu des avancées considérables. En 1989, Tim Berners-Lee propose un projet de système hypertexte en réseau, et réalise en 1990 un prototype qui est à la fois un navigateur et un éditeur de pages Web [34]. Il invente également le langage « HTML » pour la description des pages Web et le protocole communication « HTTP » entre navigateurs et serveurs Web.

En 1991, Mark Weiser introduit un nouveau concept de l'informatique appelé l'Ubiquitous Computing [180], ou Ubicomp. Il propose l'accès à l'information en ligne en tout lieu et en toute circonstance. Dans ce cadre, Mark Weiser développe, dans les laboratoires de Xerox, des prototypes de systèmes Ubicomp avec des ordinateurs de trois tailles (badge, bloc-notes et tableau) capables de communiquer entre eux pour fournir un réel environnement interactif.

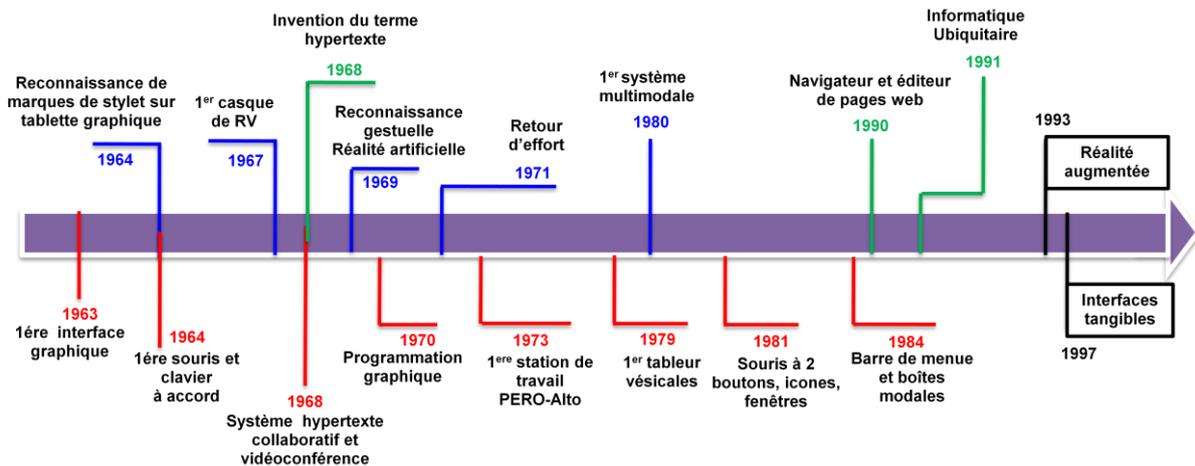


Figure 1.4 Evolution des systèmes interactifs selon Charfi [64].

Avec l'avènement de nouvelles technologies et les avancées considérables en termes de logiciels développés, particulièrement en vision par ordinateur, nous avons vu l'apparition de la réalité augmentée en 1993 (cf. Figure 1.4).

La réalité augmentée est définie comme l'ensemble des méthodes destinées à améliorer la perception d'une personne vis-à-vis de son environnement réel, généralement par superposition d'images de synthèse (textes, objets 3D, etc.) sur des images réelles. Par rapport à la réalité virtuelle, la réalité augmentée se caractérise par le fait qu'elle enrichit le monde réel au lieu de le remplacer. Comme premier système de réalité augmentée est né le Digital Desk [182]. Ce système intègre les fonctions offertes par les bureaux numériques, comme la calculatrice, dans un bureau physique. Depuis, plusieurs recherches ont été menées dans le domaine de la réalité augmentée et ont entraîné l'apparition des interfaces tangibles (Tangible User Interface en anglais) en 1997 avec les travaux d'Hiroshi Ishii et Brygg Ullmer [108]. Le but des interfaces tangibles étant de matérialiser les informations numériques.

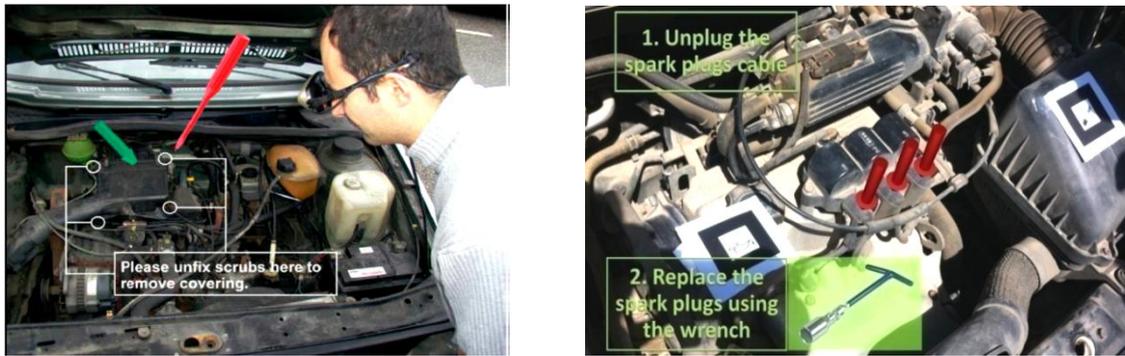
I.6.3 Nouveaux paradigmes d'interaction

Nous avons assisté à une évolution des modalités d'interaction du geste, de la parole, du rendu sonore et du rendu graphique. Cependant, l'utilisateur, manifeste toujours un manque d'adaptation avec les interfaces en utilisant ces modalités. Par exemple, l'utilisation du système multimodal de Bolt « Put that there », combinant des modalités verbale et gestuelle [38] entraîne la déconcentration et le stress pour l'utilisateur. Pour cela, il est devenu indispensable de penser à des modalités plus évoluées à celles existantes.

L'objectif est de minimiser ou de supprimer la séparation qui existe entre le monde physique et le monde numérique afin d'aboutir à des systèmes interactifs qui nous permettent d'interagir avec nos cinq sens d'une façon naturelle. En intégrant les systèmes interactifs dans l'environnement des utilisateurs, nous pouvons espérer créer des systèmes répondant au mieux aux besoins des utilisateurs dans leur vie quotidienne et répondant aux critères d'utilité et d'utilisabilité qui ont dû être négligés pendant plusieurs années selon [130]. Dans cette optique, nous avons assisté à l'émergence de nouveaux paradigmes d'interaction, essentiellement, la réalité augmentée, la réalité mixte et les interfaces tangibles [93].

I.6.3.1 Réalité augmentée

Le terme « Réalité Augmentée (RA) » a été introduit au début des années 1990 [57] afin de désigner des systèmes interactifs caractérisés par la présentation combinée et en temps réel d'entités virtuelles (générées par un ordinateur) et d'éléments physiques de l'environnement réel [8]. Des exemples de vues « augmentées », associant des images d'objets physiques réels (moteur d'une voiture) et des éléments virtuels (instructions de démontage [76] et de réparation), sont présentés ci-dessous (cf. Figure. 1.5).



a. Instructions de démontage

b. Instructions de réparation

Figure 1.5 Exemples de systèmes de réalité augmentée.

Critiquable d'un point de vue lexical et conceptuel, le terme « RA » a été progressivement précisé, étendu à une multitude d'autres dénominations telles que la « virtualité augmentée » et la « réalité mixte » [81].

I.6.3.2 Réalité mixte

Le terme « Réalité Mixte (RM) » représente un aspect plus général que la réalité augmentée. Elle est définie comme un système qui permet de mélanger des données des mondes physique et numérique avec des proportions différentes [123]. Dans ce cas, nous distinguons deux cas possibles. Si les données physiques sont majoritaires, nous parlons alors de systèmes de Réalité Augmentée (RA). Dans le cas contraire, si les données numériques sont majoritaires, il s'agit de systèmes de Virtualité Augmentée (VA) [58].

Renevier [150] donne une autre définition de la réalité mixte. Il s'agit de tout système qui met en œuvre une ou plusieurs augmentations. Une augmentation est l'expression d'un lien entre le monde physique et le monde numérique, c'est-à-dire [58]:

- Soit l'ajout d'une entité d'un des deux mondes dans l'autre monde,
- Soit la manipulation d'une entité d'un des deux mondes par des outils de l'autre monde.

Enfin, Otmane [138] définit dans la réalité mixte par sa finalité. Cette définition est donnée comme suit [138]: « La finalité de la réalité mixte (RM) est de permettre à une personne (ou plusieurs) des interactions multi-sensorielles (audio, vidéo et haptique) avec un environnement qui fait coexister les deux mondes virtuel et réel. L'environnement peut être un espace intérieur ou bien extérieur. L'utilisateur peut être présent dans l'environnement réel (RM en vision directe) ou peut le percevoir à distance (RM en vision indirecte) ».

I.6.3.3 Informatique ubiquitaire

L'informatique ubiquitaire, appelée également informatique pervasive ou omniprésente a été proposée par Weiser [180], [181] comme une façon de réunir les mondes physiques et numériques. Elle représente un modèle d'ordinateur dans lequel le traitement de l'information a été complètement intégré dans tous les objets des activités journalières. Dans ce cas, l'utilisateur a accès à un ensemble de services au travers des interfaces distribuées et intelligentes [145]. Il s'agit donc d'avoir des ordinateurs petits qui incluent des capteurs et des afficheurs pour communiquer avec l'environnement et les utilisateurs connectés en réseau [58].

I.6.3.4 Interfaces tangibles

Une interface utilisateur tangible (TUI = Tangible User Interface, en Anglais) est une interface utilisateur dans laquelle une personne interagit avec l'information numérique par le biais d'un objet physique. Un des pionniers dans les interfaces tangibles est Hiroshi Ishii, professeur au laboratoire MIT, et dirige le groupe « Tangible Media ». Sa vision particulière des interfaces tangibles est de donner une forme physique à l'information numérique directement manipulable et perceptible [108]. La figure 1.6 montre un exemple d'interface tangible qui est un prototype de cuisine avancée, conçu par Philips. A titre d'exemple, la table de cuisson se contrôle de façon tangible. Un halo de lumière entoure chaque appareil et suit ce dernier lors de son mouvement [93].



Figure 1.6 Exemple d'interface tangible (Cuisine "Verte" de Philips Design).

Notons que les interfaces tangibles sont considérées comme un cas particulier de la virtualité augmentée et donc comme faisant partie de la réalité mixte [58], [93].

En résumé, pour distinguer les différents styles d'interaction, Rekimoto et Nagao proposent une taxonomie représentative en mettant en valeur les frontières entre le monde numérique et le monde physique (cf. Figure 1.7) [58], [149].

L'interface graphique classique : l'interaction entre l'utilisateur et l'ordinateur est totalement séparée de l'interaction entre l'utilisateur et le monde réel.

La réalité virtuelle : le monde numérique entoure complètement l'utilisateur et l'interaction avec le monde réel disparaît.

Informatique ubiquitaire : l'utilisateur interagit avec le monde réel et aussi avec les objets virtuels incrustés aux objets réels.

Réalité augmentée : l'interaction de l'utilisateur avec le monde réel est augmentée par des objets virtuels.

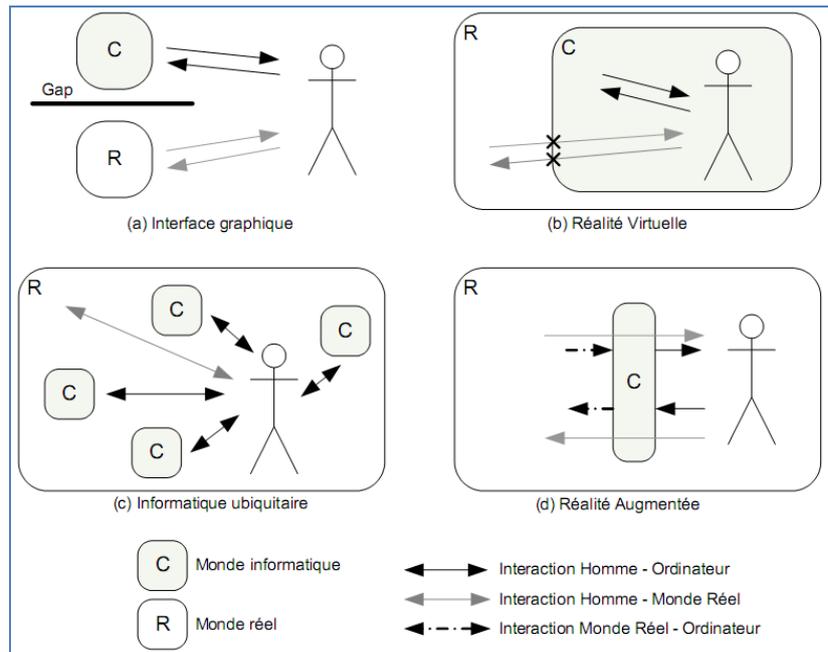


Figure 1.7 Les différents types d'interaction dans le cas des systèmes interactifs [149].

I.6.4 Systèmes Interactifs Mixtes

Les sections précédentes ont mis en avant le paradigme des systèmes interactifs et les différents changements qui se sont produits avec l'émergence des techniques d'interaction et la prise en compte de l'environnement physique des utilisateurs. Ces techniques d'interaction possèdent des spécificités particulières.

En effet, la réalité augmentée est caractérisée par la combinaison d'entités virtuelles et d'éléments physiques de l'environnement réel. L'informatique ubiquitaire permet un traitement de l'information complètement intégré dans tout type de dispositif (PDA, carte embarquée, etc.). Les interfaces tangibles permettent d'aller au-delà des interfaces graphiques traditionnelles en proposant des objets physiques comme ressources d'interaction. La réalité mixte met en œuvre une ou plusieurs augmentations qui représentent l'expression d'un lien entre le monde physique et le monde numérique par ajout ou manipulation d'entités d'un des deux mondes dans l'autre monde.

Pour fédérer ces différents aspects, Dubois [84] introduit le terme « **Système Interactif Mixte (SIM)** », appelé également **Système de Réalité Mixte (SRM)** ou **Système Mixte (SM)**.

Pour classifier les systèmes interactifs mixtes, Dubois reprend le continuum de la réalité mixte de Milgram [123] et ajoute la notion de cible de l'augmentation [84]. Cette cible correspond à l'objet principal d'une tâche interactive mixte et peut être physique ou numérique. Il en résulte deux continuums, un pour décrire la réalité augmentée et un autre pour décrire la virtualité augmentée (cf. Figure 1.8).

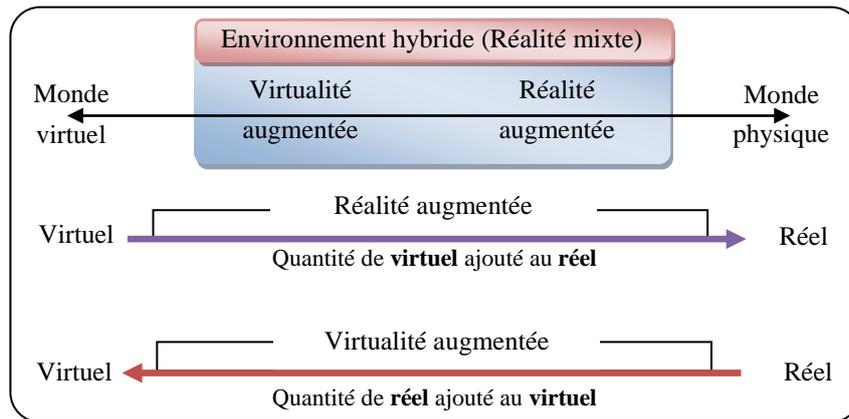


Figure 1.8 Taxonomie sur la réalité mixte selon Milgram [123] et Dubois [84].

Cette taxonomie permet d'identifier deux types de systèmes mixtes : la réalité augmentée, où l'objet de la tâche est une entité de l'environnement physique de l'utilisateur, et la virtualité augmentée où l'objet de la tâche est une entité virtuelle dont la manipulation ou la perception s'appuie sur des outils du monde réel.

En résumé, nous retenons les définitions suivantes concernant les systèmes interactifs mixtes (SIM):

Dubois [84] décrit un système mixte comme tout système interactif mêlant une partie du monde réel et une partie du monde virtuel. Dans [150], le terme système mixte est défini comme étant un système qui met en œuvre une ou plusieurs augmentations. Selon Charfi [64], un système interactif mixte est un système dont l'accomplissement de la tâche interactive implique des objets physiques et des objets numériques.

D'une façon générale, un système interactif mixte est un système qui intègre les spécificités de la réalité mixte dans les propriétés des systèmes interactifs.

1.6.5 Prototypage des systèmes interactifs mixtes

Les systèmes interactifs mixtes sont généralement construits suivant une architecture constituée de modules communs. D'une façon générale, une caméra filme la scène, un ordinateur génère des entités virtuelles en fonction de ce qui est perçu et des informations relatives à différents capteurs (position, orientation, etc.), puis le résultat est visualisé par l'utilisateur via un dispositif d'affichage. La figure 1.9 illustre, sous forme de modules, la constitution générale d'un système interactif mixte [35].

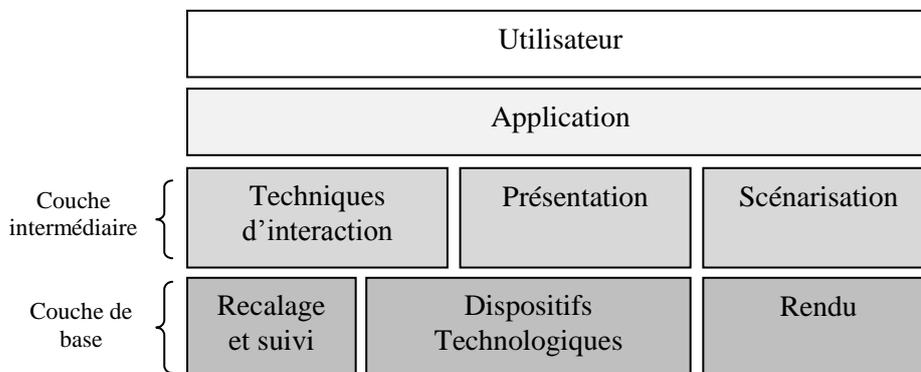


Figure 1.9 Modules d'un système interactif mixte.

I.6.5.1 Couche « Utilisateur »

Cette couche consiste à intégrer les caractéristiques et les besoins de l'utilisateur dans la démarche de conception d'une application de réalité mixte. En effet, les facteurs sociaux, la résistance au changement ou encore le niveau d'exigence du domaine ciblé sont des éléments primordiaux à prendre en compte pour augmenter le degré d'acceptation de l'utilisateur vis-à-vis de l'application.

I.6.5.2 Couche « Application »

Ce niveau, entièrement réalisé de façon logicielle, peut être développée grâce à des Kits de Développement Software (SDK). L'avantage est de pouvoir profiter au maximum des puissantes fonctionnalités offertes par les ordinateurs actuels (cartes graphiques, processeurs multi-cœurs, etc.) ou des utilitaires existants (interactions physiques 3D, détection de collision, rendu 3D complexe, etc.).

I.6.5.3 Couche intermédiaire

Elle s'occupe des méthodes d'interaction avec l'utilisateur, de la façon de présenter les informations virtuelles et des moyens pour les mettre en scène. Les modules de cette couche qui sont dérivés, pour la plupart, des techniques de la réalité virtuelle, sont adaptés à la réalité mixte.

– *Techniques d'interaction* : ce module fournit des outils pour manipuler des éléments virtuels. Plusieurs travaux ont été réalisés pour développer des techniques d'interaction. Nous citons par exemple la technique de manipulation proposée dans le cas des interfaces tangibles [106], [165]. Elle consiste à utiliser des objets réels en vue d'interagir avec les éléments du monde numérique. Ils existent encore d'autres recherches visant à développer des systèmes interactifs 2D/3D où l'utilisateur manipule des objets virtuels en utilisant des objets virtuels [29] ou une main naturelle [22]. Récemment, des chercheurs ont développé des techniques d'interaction 3D collaborative [140].

– *Présentation* : ce module s'occupe de la façon dont sera présenté l'ensemble des informations virtuelles sur une scène réel en respectant la cohérence entre les deux mondes.

– *Scénarisation* : c'est la scénarisation du monde virtuel associé au monde réel. Il peut s'agir d'une animation qui guidera l'opérateur dans l'accomplissement de sa tâche. Cette mise en scène nécessite d'utiliser des méthodes et outils adaptés comme composAR [169], BuildAR développés au HitLab [Hitlab] ou encore le moteur graphique d'OpenSceneGraph [177].

I.6.5.4 Couche de base

C'est le plus bas niveau du système, incluant les composants fondamentaux, logiciels et matériels, à savoir le suivi et le recalage, les dispositifs technologiques et le rendu. Beaucoup de travaux, à l'heure actuelle, se focalisent sur ces composants.

– *Rendu* : en informatique, le rendu est un processus permettant de passer d'une scène géométrique 3D à une image 2D en respectant un point de vue, les textures, l'illumination et les ombres associées. Le but ultime étant de ne pas pouvoir distinguer les objets virtuels des objets réels lors de la fusion des deux mondes.

Une fois le rendu visuel établi, le résultat peut être visualisé suivant deux modes distincts : en vision directe ou bien en vision indirecte :

La vision indirecte regroupe les techniques où la vue du réel est restituée par une caméra sur un afficheur généralement vidéo. Ainsi, l'utilisateur ne perçoit pas directement le mixage réel/virtuel. Ce dernier étant effectué par un ordinateur puis présenté sur un écran par exemple.

La vision directe permet à l'utilisateur de percevoir directement le réel sans processus de traitement. Ceci est possible en utilisant un système optique placé devant les yeux. Ce système effectue le mixage entre les rayons lumineux de la scène réelle avec les rayons lumineux provenant de l'afficheur vidéo miniature présentant les entités virtuelles.

– *Dispositifs technologiques* : la configuration matérielle des systèmes de réalité mixte peut être regroupée en trois différentes parties :

1. Les dispositifs de sortie ou de présentation d'information : ils sont indispensables pour rendre les informations numériques perceptibles par l'utilisateur dans un environnement de réalité mixte.

Les dispositifs utilisés sont les casques de visualisation HMD, les Tablettes-PC, les i-phones ou encore les téléphones portables.

Pour des affichages plus larges, les vidéoprojecteurs sont les plus utilisés. Il est possible aussi d'avoir des écrans larges comme dispositif d'affichage. Contrairement aux casques de visualisation, les affichages larges favorisent la coopération et la collaboration entre les utilisateurs.

2. Les dispositifs d'entrée d'information : nous distinguons deux types de dispositifs, les dispositifs de localisation [64] et les dispositifs d'interaction [5], [58], [64], [128].

3. Unité de traitement portable ou fixe : C'est un dispositif qui traite les informations issues des dispositifs de localisation et d'interaction et les affiche au niveau des dispositifs d'affichage de telle sorte que le recalage réel/virtuel ainsi que le rendu soient correctement réalisés.

– *Suivi et recalage* : la réalité mixte a pour objectif de faire coïncider visuellement le virtuel et l'environnement physique en temps réel. Pour ce faire, la localisation (position et orientation) de la scène réelle (ou d'un objet dans la scène réelle) par rapport à un point de vue (celui de l'utilisateur par exemple) doit être effectuée d'une façon précise et correcte. Dans ce cas, deux types de problématique sont à prendre en considération. Il s'agit des problématiques de suivi (*Tracking* en Anglais) et de recalage (*Registration* en Anglais). Notons que plusieurs approches ont été proposées pour aborder les deux aspects [40], [90], [102], [113], [167]. Ils existent deux grandes familles de méthodes de suivi, à savoir, les méthodes basées capteurs et les méthodes basées vision (voir étude comparative des différentes méthodes effectuée dans [30]). Cependant, ces méthodes posent encore des problèmes liés principalement à la précision du suivi entre objets virtuels et réels, à la robustesse et au temps réel. Dans notre cas, nous avons proposé (cf. Chapitre 4) une méthode de suivi [20], [27], en apportant des améliorations à une méthode de suivi existante dans la littérature.

I.7 Applications des systèmes interactifs mixtes

Nous avons constaté ces dernières années que plusieurs domaines ont manifesté leur intérêt pour l'utilisation de la réalité mixte et les systèmes interactifs. L'objectif est d'apporter de l'assistance aux utilisateurs. Ainsi, plusieurs applications, beaucoup plus des prototypes, ont déjà vu le jour.

L'une des premières applications des systèmes interactifs fût apparaître les années 90. En 1993 un premier prototype « digital desk » a été réalisé par Wellner [183] et Mackay [119]. Ces auteurs ont proposé d'augmenter les éléments papiers présents sur un bureau.

Depuis, les systèmes interactifs ont vite trouvé leur place dans des domaines comme la médecine, le militaire, l'architecture, la culture et l'industrie.

I.7.1 Systèmes interactifs mixtes dans l'industrie

La réalité mixte et les systèmes interactifs ont fortement contribué dans l'industrie [8], [121] telles que dans la fabrication, l'assemblage, la conception mécanique, la planification industrielle et plus particulièrement dans la maintenance [61]. En effet, les différentes applications de la réalité mixte en milieu industriel visent à simplifier considérablement certaines tâches en ajoutant des informations supplémentaires, qui ne sont pas directement accessibles à l'environnement de travail de l'utilisateur.

I.7.2 Systèmes interactifs mixtes dans le domaine de la maintenance

Malgré l'apport des approches traditionnelles dans l'aide à la maintenance telles que l'utilisation de la documentation et l'assistance téléphonique, les opérateurs de maintenance ont manifesté leur mécontentement à l'égard de ces méthodes (cf. Sections I.5.1 et I.5.2).

Ainsi, l'industrie a bien compris que les systèmes interactifs et la réalité mixte peuvent être des solutions pertinentes pour augmenter les performances des systèmes d'aide. Cependant, l'introduction de ces technologies émergentes se fait généralement en plusieurs étapes tributaires des améliorations progressives de la recherche dans le domaine. Ainsi, divers projets ont fait leur apparition afin d'utiliser les technologies émergentes dans la maintenance. Nous nous basons sur la classification de [41] pour présenter quelques projets de maintenance. Cette classification permet de distinguer deux types d'assistance : automatisée et supervisée.

I.7.2.1 Systèmes interactifs avec assistance automatisée

Un système interactif avec assistance automatisée est une application de réalité mixte qui fonctionne de manière autonome. Les différentes informations concernant l'aide sont implémentées au préalable dans cette application qui est utilisée par l'opérateur durant son intervention. Les systèmes d'aide automatisés sont développés autour des projets suivants:

(a) Le projet KARMA

Le projet KARMA [89], pour « *Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance* » a été réalisé pour guider un opérateur dans la réalisation de tâches de maintenance sur des imprimantes laser.

(b) Le projet ARVIKA

Le projet ARVIKA (*Augmented Reality for development, production and services*) qui a été initié en 1999 pour une période de quatre années [Arvika] avait pour objectif de déterminer comment utiliser les technologies de la réalité mixte dans le secteur industriel, en l'intégrant au plus tôt dans le cycle de

vie des produits. En se basant sur l'expérience acquise précédemment, le successeur du projet ARVIKA, nommé ARTESAS (*Advanced augmented Reality Technologies for industrial Service Application*) a mis l'accent sur le développement d'un système de suivi de position pour les environnements industriels difficiles [186], et sur les aspects ergonomiques des implémentations.

(c) Le projet STARMATE

Le projet STARMATE (*SysTem using Augmented Reality for Maintenance, Assembly, Training and Education*) [162] fut un programme à l'échelle européenne composé de l'institut Franhofer, EADS, Thales optronic (anciennement Thomson CSF), Dune, Tectnatom et CS-SI. Il s'est déroulé sur la période 2000-2002. Son objectif était de développer un prototype permettant d'assister un opérateur dans l'accomplissement de tâches de maintenance sur des systèmes mécaniques complexes. L'autre objectif était de pouvoir fournir une assistance de formation aux opérateurs novices sur ces mêmes tâches.

(d) Le projet ULTRA

Nous avons assisté à l'apparition du projet ULTRA (*Ultra portable augmented reality for industrial maintenance applications*) [152] qui a développé une architecture logicielle pour la génération de manuels de réalité augmentée et d'assistance sur site pour des ouvriers de maintenance utilisant des dispositifs mobiles.

(e) Le projet AMRA

Le projet AMRA pour « *Augmented Reality Assistance for Maintenance* » était un projet placé sous la tutelle du ministère de la Recherche française durant la période 2002-2004 [80]. Son principal objectif était d'implémenter un système de réalité augmentée mobile pour la maintenance industrielle afin de fournir une aide contextuelle à des opérateurs novices, apporter une assistance en donnant l'accès à des informations pertinentes aux agents expérimentés, et rendre disponible l'information via les techniques d'affichage de la réalité augmentée. Le projet AMRA utilise une visualisation de données type «Window on the World», c'est-à-dire en vision indirecte via une Tablette-PC [80].

(f) Le projet de BMW

Dans le contexte industriel, la société allemande METAIO, en collaboration avec BMW, a développé pour celle-ci en 2006 un prototype de « service du futur » pour aider les opérateurs en maintenance sur les voitures de marque [144].

(f) Le projet ARMAR

Débuté en 2007, le projet ARMAR « *Augmented Reality for MAintenance and Repair* » explore l'utilisation de la réalité augmentée pour aider à l'exécution de tâches procédurales de maintenance [103]. Feiner et Henderson ont développé un système de réalité augmentée composé d'un afficheur "Video See Through" binoculaire surmonté d'un dispositif de suivi de mouvements et d'une unité de calcul mobile reliée à un réseau sans fil. Les concepteurs se sont également intéressés à développer une nouvelle façon d'interagir avec l'interface du système de réalité augmentée [104], [106].

I.7.2.2 Systèmes interactifs avec assistance supervisée

Les systèmes interactifs basés sur l'aide supervisée consistent à fournir un moyen de communication entre un opérateur et un expert utilisant les aspects de la réalité mixte. Autrement dit, l'opérateur est muni d'un système lui permettant de se faire assister par un expert distant dans l'exécution de tâches. L'objectif est d'ajouter à la modalité audio et la modalité visuelle classique, les modalités de spécifiques à la réalité mixte. Dans ce cas, plusieurs travaux ont été réalisés pour le développement des systèmes d'aide supervisés. Ci-dessous, nous énumérons quelques-uns de ces travaux:

(a) Le prototype de Zhong

Le projet développé par Zhong [190] est un prototype d'un système collaboratif pour la téléformation industrielle basé sur la réalité augmentée. Le principe de fonctionnement est de permettre à un opérateur de se faire assister dans sa tâche de maintenance, de carte mère d'une unité centrale, par un expert éloigné.

(b) Le système WACL

Le système WACL (Wearable Active Camera with a Laser pointer) [158], [159] est constitué essentiellement d'un terminal porté sur l'épaule de l'opérateur. Il est composé d'une caméra motorisée et d'un laser, le tout pilotable à distance par un expert. Grâce à la caméra pilotable, l'expert distant peut explorer l'environnement de l'opérateur pour le guider de façon plus efficace dans sa tâche. Cette caméra embarquée permet à l'expert distant de regarder de façon indépendante dans l'espace de travail de l'opérateur. L'expert peut, aussi, pointer vers des objets réels dans l'espace de travail avec le spot laser.

(c) Le système CAMKA

Le système CAMKA [Couedelo] initié en 2005 permet à un expert d'assister à distance un opérateur en utilisant des outils multimédias. Le système est constitué d'un casque équipé d'un microphone, d'écouteurs, d'une caméra et d'un afficheur vidéo. La caméra capture un flux vidéo et envoie par la suite à l'expert. Celui-ci capture une image du flux vidéo, ajoute des annotations puis renvoie l'image enrichie vers le dispositif d'affichage de l'opérateur.

(d) Le système T.A.C (Télé-Assistance Collaborative)

Le système de Télé-Assistance Collaborative proposé dans [41] permet de réaliser des tâches de maintenance à travers une assistance distante. Ce système permet à un expert distant de voir exactement ce que l'opérateur observe de son environnement de travail. Il peut interagir avec lui en temps réel grâce à la réalité augmentée via le paradigme d'interaction POA (Picking Outlining Adding). En guidant l'opérateur grâce à des indices virtuels, l'expert lève les ambiguïtés de langage et les difficultés de communication sont ainsi évitées.

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, en premier lieu, les enjeux de la maintenance industrielle ainsi que leur rôle dans la croissance des performances de l'entreprise. Nous nous sommes ensuite orientés vers l'étude des systèmes d'aide existants. Nous avons constaté les lacunes que présentent les types d'aide classique. En effet, l'opérateur reste toujours insatisfait à l'égard de ces types d'aide : aide fastidieuse, non précise et insuffisante.

Pour cela, nous assistons à une attente forte du monde industriel pour intégrer de nouveaux outils d'assistance à travers la réalité mixte. Ce besoin exprime les difficultés rencontrées par les techniciens en maintenance actuellement confrontés à la grande variété de systèmes mécatroniques de plus en plus complexes et au renouvellement des gammes de plus en plus rapides.

En ce sens, nous avons, dans ce chapitre, passé en revue l'ensemble des systèmes interactifs d'aide à la maintenance et ceci après avoir abordé les concepts des systèmes interactifs et les nouveaux paradigmes d'interaction.

Les systèmes proposés permettent de guider l'opérateur durant l'intervention par des procédures standards décrites sous formes de modèles virtuels. Cependant, les solutions basées sur la réalité augmentée accordent plus d'importance à la visualisation de l'information en 3D plutôt qu'à l'interaction de l'utilisateur avec ces informations. Cet aspect n'est jusqu'à présent pas suffisamment pris en compte dans les systèmes proposés pour l'aide à la maintenance.

D'autre part, les systèmes d'aide supervisés développés accordent une importance aux aspects de coopération/collaboration [14] plutôt qu'aux aspects de réalité mixte

Enfin, ces systèmes sont arrivés à une maturité technologique mais ils ne sont pas encore prévus, dans la plupart des cas, pour une intégration industrielle. Dans ce cadre, un effort reste à entreprendre pour l'intégration de ces systèmes dans l'écosystème de l'entreprise afin qu'elle soit exploitable par les opérateurs. Ainsi, le problème d'utilisabilité de l'application n'est pas encore résolu, puisque, les caractères psychologique, cognitive, émotionnel, des utilisateurs ne sont pas pris en considération dans le développement des applications interactives.

Notre objectif est de concevoir un système interactif mixte en prenant en compte le contexte industriel et les besoins des opérateurs. Notre principal but est d'augmenter les performances du système d'assistance et d'envisager une démarche de coopération permettant à l'expert d'échanger et de partager avec l'opérateur les informations pertinentes d'une façon visuel. Dans le chapitre suivant, nous présentons les différents aspects liés au développement des systèmes interactifs, l'intégration de ces systèmes dans le système d'information de l'entreprise et l'implication de l'utilisateur dans le processus de développement de ces systèmes.

Chapitre II Systèmes interactifs mixtes (SIM) : approches et méthodes de développement

II.1 Introduction

Nous avons vu à travers les projets réalisés [41], [61], la contribution des systèmes de réalité mixte dans l'assistance des utilisateurs dans leurs tâches. L'exécution des tâches de maintenance devient plus efficace lorsque nous utilisons des interfaces interactives que les mêmes tâches, exécutées avec des interfaces classiques basées sur l'écran, le clavier, et la souris. Ces dernières années, la diffusion toujours plus large d'applications utilisant la réalité mixte transforme ce secteur, auparavant très spécialisé et fortement lié au monde académique, en une industrie de consommation courante.

Il existe donc un ensemble de pratiques et savoir-faire, issus des laboratoires, entraîné de s'organiser et de se structurer afin d'intégrer de nouvelles solutions d'interfaces interactives dans leur système d'information. Les entreprises sont, en outre, encouragées par la vulgarisation des technologies de haut niveau tels que les systèmes de reconnaissance des gestes et de localisation de l'utilisateur, intégrés dans des dispositifs domestiques ou mobiles, accès Internet haut débit sur les dispositifs mobiles, technologie GPS, caméra infrarouge, vidéoprojecteur 3D, etc. A ce titre, malgré la qualité des solutions proposées, il a été constaté que les entreprises nécessitent un effort supplémentaire pour l'adoption des systèmes de réalité mixte développés.

Il s'est avéré que le développement de systèmes interactifs génère plusieurs contraintes dont les contraintes ergonomiques. En effet, la négligence des aspects ergonomiques liés aux utilisateurs des systèmes interactifs mixtes peut entraîner des problèmes de confort, d'adaptation à ses systèmes. En plus, les systèmes de réalité mixte représentent une technologie, parfois plus avancée que les capacités cognitives des utilisateurs, où certaines manipulations peuvent déconcentrer certains utilisateurs (affichage 3D, touches tactiles, menu 3D, etc.). Comme conséquence de ces contraintes, il a été constaté que les méthodes de développement utilisées pour la construction de ces applications ne traitent l'utilisabilité des systèmes développés que marginalement.

D'autre part, les systèmes interactifs réalisés sont souvent présentés sous forme d'applications dissociées du système informatique de l'usine. Ces applications, ne sont pas soumises à un processus de développement depuis l'expression des besoins jusqu'à leur intégration dans l'environnement industriel. Cette situation fait que l'intégration de ces systèmes dans le processus global de l'entreprise est irréalisable. Ceci entraîne, encore une fois, la négligence des aspects ergonomiques liés aux utilisateurs de ces systèmes. Comme conséquence, ces systèmes restent insuffisants pour répondre aux objectifs de la maintenance dans le contexte industriel.

Dans ce chapitre, nous présentons les enjeux et l'intérêt des méthodes de développement dans la mise en œuvre et l'intégration des systèmes interactifs dans le système d'information de l'entreprise. Nous accordons, par la suite, plus d'importance aux méthodes de développement des systèmes interactifs mixte qui constituera, par la suite, le point de départ de nos contributions.

II.2 Pourquoi le développement des systèmes interactifs ?

Au cours de la quinzaine d'années d'évolution des méthodes de développement des systèmes interactifs, la souplesse des démarches de développement ainsi que l'implication des utilisateurs dans le processus de développement sont progressivement devenues des préoccupations prédominantes.

Le rapport « CHAOS » du Standish Group publié en 1995 [166] a fait l'état d'un taux d'échec des projets de développement informatique alarmant : 31,1% des projets sont annulés et 52,7% conduisent à des dépassements de coût, d'agenda de livraison ou présentent des fonctionnalités incomplètes [94].

Le rapport, à l'issue de son analyse, identifie un ensemble de critères pour la réussite des projets informatiques. Parmi ces critères, nous citons l'implication des utilisateurs dans le processus de développement, la définition claire des besoins et l'adaptation du cycle de développement à leur évolution. Nous constatons, ainsi, que ces critères nécessitent une prise en charge par un processus de développement.

Dans notre cas, nous nous focalisons sur les méthodes de développement afin de concevoir des systèmes interactifs pour l'aide à la maintenance. Plusieurs raisons ont conduit à ce choix. La première est que, la plupart de ces méthodes sont accessibles gratuitement et compréhensibles par les industriels. La deuxième raison, est que ces méthodes peuvent être utilisées par des acteurs issus de diverses disciplines (informatique, électronique, automatique, etc.). Elles constituent un moyen pour produire des modèles communs compréhensibles par tous les acteurs de développement. La troisième raison est que ces méthodes de développement permettent la réalisation complète de l'application depuis l'expression des besoins (exemple : besoins et caractéristiques des réparateurs, contexte de la maintenance, etc.) jusqu'à la l'implantation de l'application dans le système d'information de l'entreprise.

II.3 Processus de développement et modèles de conception pour les systèmes interactifs

La conception d'un système interactif est essentiellement basée sur un processus de développement issus des pratiques de génie logiciel (GL). Ce processus comporte différentes phases allant de l'expression des besoins des utilisateurs jusqu'à l'intégration du produit final.

Un **processus** définit une séquence d'étapes, en partie ordonnées, qui concourent à l'obtention d'un système logiciel ou à l'évolution d'un système existant.

Le processus de développement, appelé également méthode de conception, d'un produit (ex. système informatique) est en général divisé en quatre principales phases : l'analyse, la conception, l'implémentation et l'évaluation. Dans [64], le processus de développement d'un système interactif se repose sur l'analyse, la conception, le prototypage et l'évaluation.

II.3.1 Phase d'analyse

Cette première étape vise à préciser les attentes et les besoins des utilisateurs finaux (ex. opérateurs de maintenance). Elle permet de prendre connaissance de la tâche réelle des utilisateurs et d'analyser le contexte dans lequel ils effectuent cette tâche. La phase d'analyse permet de préciser l'utilité recherchée par les utilisateurs de l'application. Essentiellement, le déroulement de la phase d'analyse s'effectue en trois principales étapes [94] :

II.3.1.1 Analyse du processus métier ou processus fonctionnel

Un grand nombre de méthodes de développement propose, en préliminaire à la spécification du système, de décrire le métier ou autrement dit le processus fonctionnel de l'organisation. Cette description peut consister en une énumération des profils d'utilisateur, une description des activités, telles qu'elles sont initialement pratiquées par l'organisation.

II.3.1.2 Spécification des besoins

L'objectif de cette phase est de décrire les besoins du futur système interactif à développer. Il s'agit d'une manière générale d'identifier les concepts et processus applicatifs essentiels du futur système, à un haut niveau d'abstraction. Plusieurs spécialistes peuvent être concernés par cette phase : spécialiste du domaine du métier (ou du domaine d'application), spécialiste du domaine de Génie Logiciel (GL) et/ou aussi des spécialistes en Interaction Homme-Machine (IHM).

II.3.1.3 Analyse des besoins

Il s'agit de raffiner les spécifications définies lors de la précédente phase pour les traduire en une solution fonctionnelle. A ce niveau de développement nous retrouvons une transition depuis des descriptions utilisant des notations proches du langage naturel (cas d'utilisation d'UML (*Unified Modelling Language*, en Anglais) [155], scenarii, etc.) vers des notations proches du code (ex. diagrammes de classes UML). Parmi les modèles mis en jeu durant cette phase, nous citons les diagrammes de classes, les diagrammes de séquence, les diagrammes d'activités, etc.

II.3.2 Phase de conception

Les modèles recueillis de la phase d'analyse sont raffinés pour préparer la partie implémentation. Nous obtenons ainsi les différentes classes de l'application ainsi que le séquençement des tâches pour réaliser les fonctionnalités du système interactif. Parmi les données mises en jeu durant cette phase, nous citons les diagrammes d'activités, l'organigramme de base de données, la liste des classes et des associations, etc.

Dans un autre coté, une première maquette ou prototype du produit peut être conçue dans cette phase. Cette maquette résulte d'une part de l'analyse de la tâche de l'utilisateur et des spécificités du contexte de travail. Cette première maquette évoluera ensuite en fonction des retours de la phase d'évaluation. Chaque itération permet d'enrichir et de finaliser la maquette.

Les profils des spécialistes impliqués dans la phase de conception peuvent être identiques à ceux impliqués dans la phase d'analyse.

II.3.3 Phase d'implémentation

Cette phase consiste à transformer les classes et les méthodes établies durant la phase de conception en un ensemble de lignes de codes où le résultat est de réaliser la maquette définie lors de la précédente phase.

Des architectures logicielles peuvent être utilisées pour réaliser une meilleure organisation du code et faciliter sa compréhension. Parmi ces architectures logicielles, nous pouvons citer, par exemple, le modèle MVC (Model Vue Contrôleur) [116], le modèle PAC [71], le modèle Arch [15]. Les spécialistes concernés par cette phase sont les programmeurs et éventuellement les programmeurs d'interfaces.

II.3.4 Phase d'évaluation

Cette phase, qui représente la dernière étape pour boucler une itération dans un processus de développement, consiste essentiellement à mesurer l'utilisabilité du produit, autrement dit de valider la satisfaction des utilisateurs dans la réalisation des tâches évaluées. Le principal objectif de l'évaluation est de s'assurer que les fonctionnalités sont correctes.

L'une des méthodes d'évaluation les plus utilisées est le "test utilisateur" [Wiki_test_utilisateur]. Celui-ci consiste à placer l'utilisateur en situation d'utilisateur réel du produit et à observer les difficultés rencontrées.

L'évaluation permet d'identifier les points à améliorer sur la maquette et donc de préparer la version suivante qui sera à nouveau testée et ainsi de suite. Lorsque l'évaluation ne soulève plus de problèmes, il est alors possible de considérer le processus itératif comme terminé.

La phase d'évaluation est confiée aux experts du domaine de l'ergonomie de l'interface qui possèdent une expérience dans les méthodes d'évaluation ainsi que dans l'analyse et l'application de ces méthodes. Dans certains cas, des experts en Interface-Homme Machine et/ou en Interaction Homme-Machine peuvent être impliqués dans la phase d'évaluation.

Notons que certains processus de développement intègrent la phase « maintenance du produit logiciel » qui consiste à effectuer des mises à jour, des corrections des bugs ou éventuellement apporter des changements demandés par l'utilisateur du système interactif dans le produit logiciel.

II.4 Méthodes de développement des systèmes interactifs

La conception d'un système interactif est essentiellement basée sur un processus de développement issus des pratiques de génie logiciel (GL) et des modèles d'interface et d'interaction homme-machine (IHM).

II.4.1 Méthodes de conception de Génie Logiciel (GL)

Dans la littérature, plusieurs processus de développement (ou méthodes de conception) d'applications logicielles ont été élaborées. En fait, chacune de ces méthodes propose une combinaison des différentes phases de développement et ceci en fonction du contexte de l'application. Nous énumérons ci-dessous quelques-uns des processus les plus couramment utilisés et cités dans la littérature.

II.4.1.1 Cycle de développement en cascade

Le processus en cascade, développé dans les années 1970 [157], a longtemps servi de référence en conception de produits [36]. Ce processus se présente sous forme de plusieurs étapes séquentielles [157]. Le passage d'une phase à une autre est conditionné par des tests de validation [127]. Lorsqu'une phase est achevée, son résultat sert comme point d'entrée de la phase suivante. Dans ce type d'approche, le risque d'augmentation des coûts de correction des erreurs croît avec le temps. La découverte d'une erreur d'analyse ou de conception lors des tests utilisateurs, ce qui est relativement fréquent, peut entraîner l'abandon du projet compte tenu du coût excessif de la rectification.

Afin de réduire les erreurs de conception et pour une meilleure gestion des risques, le modèle en cascade a été rendu itératif (cf. Figure 2.1) [127]. En effet, un concepteur peut revenir en arrière si un problème lui a échappé au premier passage.

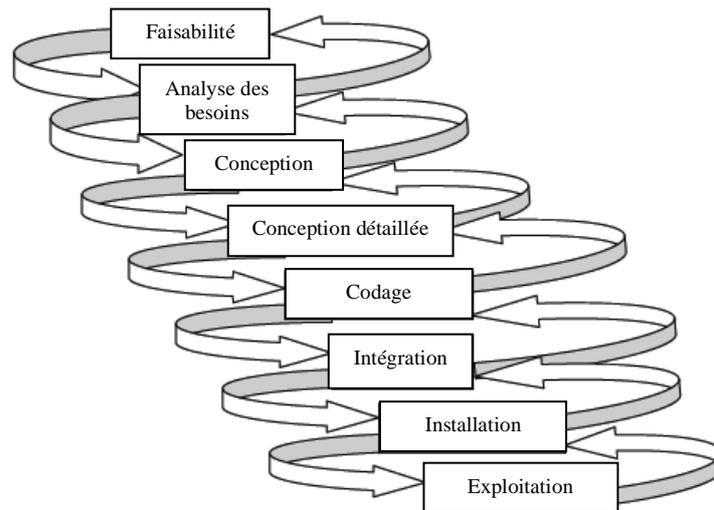


Figure 2.1 Cycle de développement en cascade.

II.4.1.2 Cycle de développement en V

Le modèle en V confronte les différents niveaux de tests avec les phases de projet de même niveau [52] (cf. Figure 2.2). Ceci permet à chaque étape de définir non seulement les fonctions, mais également les critères de validation [127]. La cohérence entre les deux éléments permet de vérifier en continu que le projet progresse vers un produit répondant aux besoins initiaux. Ce modèle est une amélioration du modèle en cascade. Il permet d'identifier et d'anticiper les éventuelles évolutions des besoins.

Nous retrouvons dans le modèle en V les étapes présentées dans le modèle en cascade. La spécification et la conception se déroulent dans une phase dite descendante, tandis que les tests et validations sont situés dans une phase dite ascendante [50].

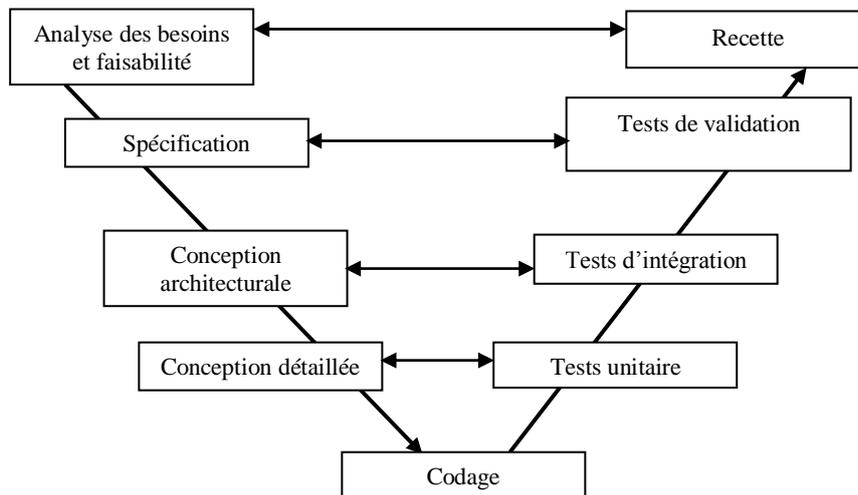


Figure 2.2 Cycle de développement en V.

Du point de vue de l'implication de l'utilisateur, comme pour le modèle en cascade, aucune recommandation précise n'est spécifiée quant aux modalités de recueil et modèles de données sur les utilisateurs finaux. Par ailleurs, il n'est pas mentionné clairement les phases dans lesquelles les utilisateurs seraient impliqués dans le cycle de conception.

II.4.1.3 Cycle de développement en spirale

Le cycle de vie en spirale (cf. Figure 2.3) est un modèle évolutif proposé par Barry W. Boehm en 1984 [37]. Ce modèle permet de placer le développement du logiciel dans un contexte commercial. Dans ce cas, le responsable de projet peut prendre des décisions concernant la faisabilité, les ressources allouées et les risques associés au développement [127], [129]. A chaque tour de la spirale, une nouvelle décision est prise sur le prochain cycle à effectuer.

L'avantage de ce cycle réside dans ses aspects itératif et évolutif, où il introduit la notion de prototypage et de raffinement. Il permet aussi de donner un livrable au client à chaque itération (ce qui permet au fournisseur de se faire payer plus régulièrement). D'autre part, ce processus permet de donner une estimation du temps que peut prendre la prochaine itération.

Malheureusement, ce processus ne propose pas une approche pour la prise en compte de l'utilisateur dans son déroulement.

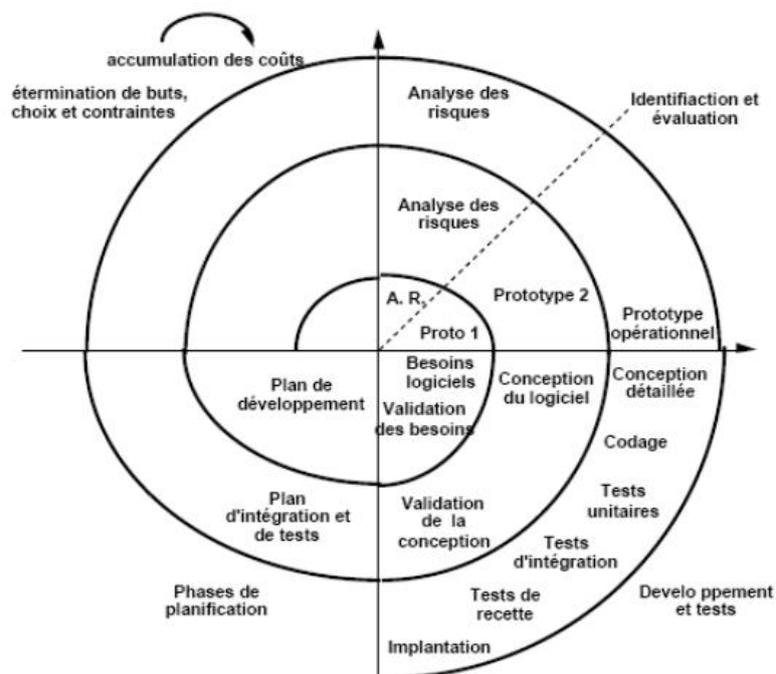


Figure 2.3 Cycle de développement en spirale.

II.4.1.4 Les processus unifiés (Unified Process)

Le succès des langages orientés objet a donné naissance à de nombreuses méthodologies de développement de logiciels [7]. La réunion des différentes approches proposées pour le développement logiciel et la naissance de la notation UML a fédéré en grande partie la communauté de conception logicielle orientée objet [92]. Le résultat était d'introduire le concept des processus unifiés (*Unified Process* (UP) en Anglais). La méthode UP, décrite en 1999 par Jacobson [111], est une base conceptuelle sur laquelle s'appuient de nombreuses méthodes actuelles. Cette méthode est considérée comme une solution alternative remplaçant les précédentes approches de conception telles que la méthode en cascade ou la méthode en V. La figure 2.4 décrit la structure de la méthode UP [111].

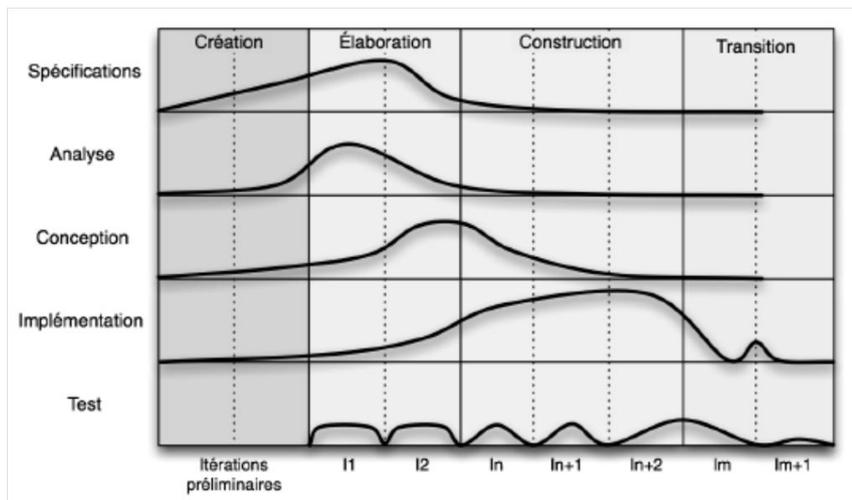


Figure 2.4 Organisation de la méthode UP.

Le processus UP s'appuie sur les propriétés suivantes [94]:

- guidée par les besoins des utilisateurs et les cas d'utilisation ;
- le développement est centré sur l'architecture logicielle et la gestion des risques ;
- le cycle de développement est incrémental au niveau global, parallélisé au niveau local et itératif;
- le cycle de développement est à base de composants ;

II.4.1.5 Processus RUP (Rational Unified process)

La méthode Rational Unified Process (RUP) est une extension commerciale de la méthode théorique UP [94] (cf. Figure 2.5). La méthode RUP modifie certains aspects de la méthode UP pour qu'elle soit plus efficace dans une optique professionnelle.

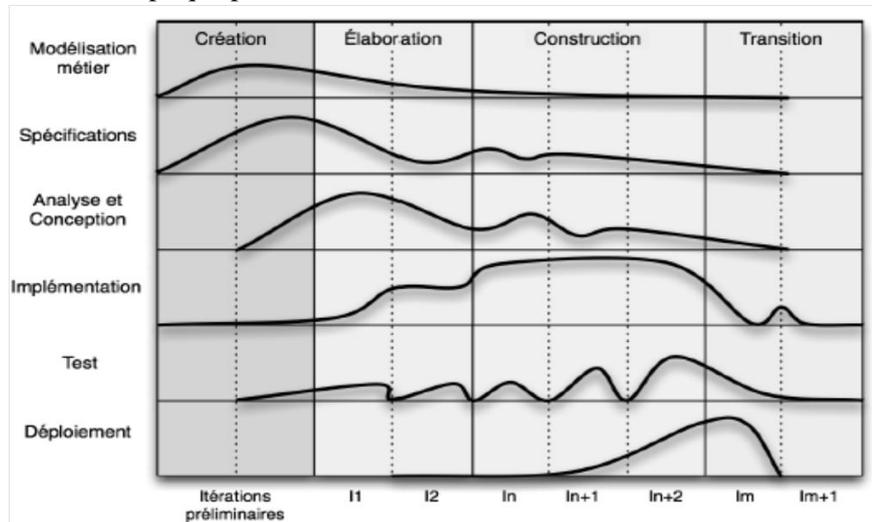


Figure 2.5 Organisation de la méthode RUP.

Outre la phase de modélisation du métier, nous constatons que la méthode fusionne les phases d'analyse et de conception. Elle introduit également une phase de déploiement.

Enfin, RUP est caractérisé par les mêmes propriétés que UP [94]:

- les entités de premier ordre sont les cas d'utilisation ;
- le développement est focalisé sur l'architecture et la gestion des risques ;
- le cycle de développement est incrémental au niveau global, parallélisé au niveau local et itératif.

II.4.1.6 Processus XP (eXtreme Programming)

La méthode eXtreme Programming (XP) (cf. Figure 2.6), proposée par Kent Beck en 1999, est une méthode agile orientée vers l'aspect « réalisation d'une application » [19]. XP est adapté aux équipes réduites avec des besoins changeants.

Cette méthode repose sur des cycles rapides de développement (des itérations de quelques semaines) dont les étapes sont les suivantes [Wiki_xp]:

- une phase d'exploration détermine les scénarios client qui seront fournis pendant cette itération;
- l'équipe transforme les scénarios en tâches à réaliser et en tests fonctionnels ;
- chaque développeur s'attribue des tâches et les réalise avec un binôme ;
- lorsque tous les tests fonctionnels passent, le produit est livré ;

Le cycle se répète tant que le client peut fournir des scénarios à livrer. Généralement, le cycle de la première livraison se caractérise par sa durée et le volume important de fonctionnalités embarquées. Après la première mise en production, les itérations peuvent devenir plus courtes (une semaine par exemple).

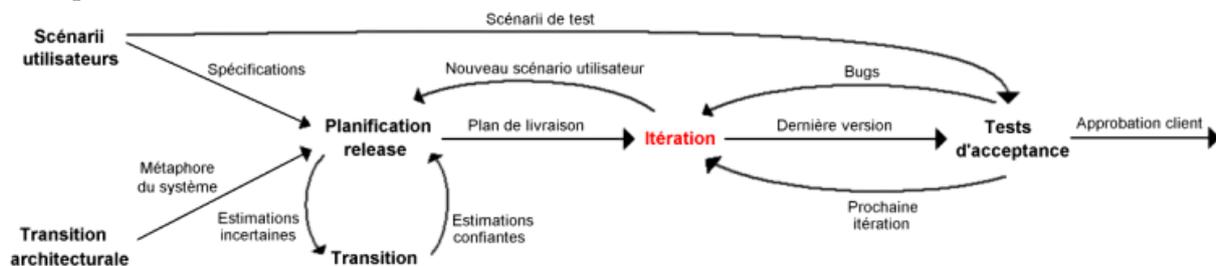


Figure 2.6 Cycle de développement XP [Wiki_xp].

Dans les méthodes agiles les utilisateurs sont, certes, fortement impliqués dans la conception, mais encouragés à établir des priorités dans leurs attentes en fonction des délais du projet. Cette stratégie contraint l'expression des besoins car l'utilisateur doit jouer le double rôle d'utilisateur/décideur.

Après avoir présenté les méthodes de développement les plus en vogue dans la communauté de Génie Logiciel, nous avons effectué une étude comparative de quelques-unes de ces méthodes, comme indiqué dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Étude comparative de quelques méthodes de développement

	Description	Points forts	Points faibles
Cascade	Propose de dérouler les différentes phases d'une façon séquentielle.	Distingue clairement les phases du projet.	Non itératif. Ne propose pas de modèles de documents.
RUP Rational Unified Process	C'est une méthodologie et aussi un outil prêt à l'emploi. Cible des projets de plus de 10 personnes.	Itératif. Formalise le dialogue entre les différents intervenants (livrables, planning,...). Propose des modèles de documents.	Couteux à personnaliser : nécessité d'un grand nombre de consultants. Très axé processus, au détriment du développement.
XP eXtreme Programming	Ensembles de « bonnes pratiques » de développement (travail en équipes, transfert de compétences, ...). Cible des projets de moins de 10 personnes.	Itératif. Simple à mettre en œuvre Consacre une importance aux aspects techniques : prototypes, règles de développement, tests, ...	Ne couvre pas les phases en amont et en aval au développement : capture des besoins, maintenance, tests d'intégration,... Assez flou dans sa mise en œuvre : quel profil pour l'intervenant, les livrables, ...

Les méthodes précédentes ne sont pas directement applicables au domaine de l'interface et de l'interaction homme-machine. En effet, ces méthodes restent souvent axées sur le développement du produit et n'accordent pas beaucoup d'importance aux aspects ergonomiques. Afin de prendre en compte les spécificités de l'interface lors de la conception d'une application informatique, des modèles et des outils doivent être intégrés dans ces processus de développement. Avant d'aborder cet aspect, nous présentons dans la section suivante, les méthodes existantes pour la conception d'IHM.

II.4.2 Méthodes pour la conception des Interfaces Homme-Machine (IHM)

Le développement d'Interfaces Homme-Machine ou appelée encore Interface Utilisateur (*User Interface* en anglais « UI ») consiste à prendre en compte les caractéristiques cognitives, physiologiques, culturelles, etc. de l'utilisateur dans les étapes de conception d'une interface. Des approches visant à considérer l'utilisateur final ont été développées. La prise en compte des utilisateurs découle du fait que le coût des interfaces développées pour une application donnée constitue environ 50% du coût global. Nous présentons ci-dessous les approches de conception d'interfaces classiques, appelée également interfaces WIMP (Windows Icon Menu Pointing).

II.4.2.1 Le prototypage

Le prototypage est une méthode proposée par Rettig [151]. Son objectif était de construire des prototypes jusqu'à ce qu'une bonne compréhension des besoins de l'application soit mise en évidence [129].

Cette méthode repose sur la définition de besoins préliminaires afin de construire une première version du prototype d'interface. Ce prototype est ensuite évalué par des utilisateurs (cf. Figure 2.7). Plusieurs itérations peuvent être effectuées afin d'aboutir au prototype final adaptés aux besoins des utilisateurs impliqués dans l'évaluation.

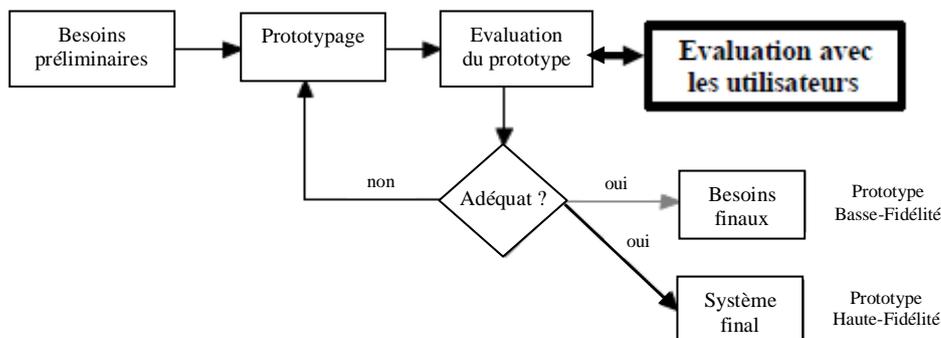


Figure 2.7 Méthode d'IHM basée sur le prototypage.

Ce processus permet de construire un système interactif lorsque la forme que doit prendre l'interaction homme-machine n'est pas claire, en permettant de faire plusieurs tentatives jusqu'à ce que les besoins soient correctement identifiés.

II.4.2.2 Modèle en couches

Le principe général de ce modèle est de proposer une division en deux parties de chaque phase de développement [75], (cf. Figure 2.8). Une partie concerne les pratiques de développement classiques du Génie Logiciel (partie droite) et une autre partie concerne l'Ingénierie d'Interface Utilisateur qui s'intéresse à la conception d'interface homme-machine (partie gauche) [129].

Engineering d'Interface Utilisateur	Phase de développement	Génie Logicielle
Analyse de la tâche et de l'utilisateur	Analyse des besoins	Conception de d'application
Homme - Machine	Assignement des besoins	Matériel - logiciel
Conception du dialogue homme-machine	Conception préliminaire	Conception de l'architecture Matériel - logiciel
Conception de l'écran	Conception détaillée	Conception logique
Codage	Implémentation	Codage
Laboratoire d'utilisabilité	Test d'implémentation	Test d'intégration
Observation contextuelle	Test du système	Test du système
Performance humaine	Optimisation	Performance de la machine

Figure 2.8 Modèle en couches.

Ce processus fournit, pour chaque phase du développement, les étapes nécessaires pour l'élaboration de la partie fonctionnelle de l'application et de sa partie interactive, ceci, en conservant une séparation claire entre ces deux parties.

Cette approche présente deux inconvénients :

- aucune mise en relation explicite des deux parties n'est effectuée ;
- la méthode est trop séquentielle, perdant les avantages d'un processus itératif comme le prototypage.

II.4.2.3 Modèle en cercle

Le modèle en cercle, décrit dans la figure 2.9, est un modèle itératif proposé par Collins [68]. Ce modèle s'intéresse à l'analyse des tâches utilisateur qui constitue une des activités indispensables dans une conception centrée utilisateur. Il en résulte une tentative d'intégration des facteurs humains et du génie logiciel [129].

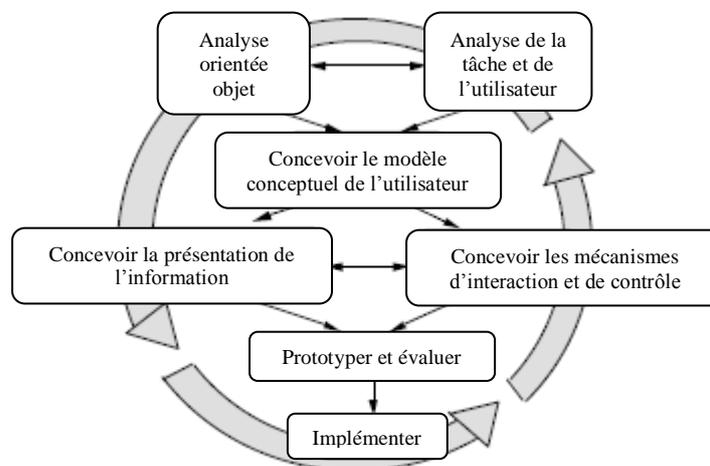


Figure 2.9 Modèle en cercle.

II.4.2.4 Conception centrée utilisateur (ISO 13407)

Selon la norme ISO 13407, la conception centrée sur l'utilisateur (CCU) ou conception orientée utilisateur (*UCD : User-Centred Design* en anglais) est une philosophie et une démarche de conception où les besoins, les attentes et les caractéristiques propres des utilisateurs finaux sont pris en compte à chaque étape du processus de développement d'un produit ou d'une application informatique. La conception centrée sur l'utilisateur est principalement basée sur des critères d'ergonomie et d'utilisabilité. Cette démarche se distingue fortement d'autres démarches de conception en cherchant à adapter le produit (généralement l'interface utilisateur) à l'utilisateur final plutôt que de lui imposer un mode d'utilisation choisi par les concepteurs.

L'approche de conception centrée utilisateur (CCU) considère les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement de produit. Cette démarche est normalisée par la norme ISO 13407 [127]. Proposée en 1999, la norme ISO 13407 met en œuvre un processus de conception complet ayant vocation à être intégré dans un cycle de développement logiciel «classique».

L'hypothèse sur laquelle s'appuie cette norme suggère que les utilisateurs finaux sont les mieux placés pour déterminer et valider leurs besoins. La conception centrée utilisateur impose donc un développement guidé par l'utilisateur, plutôt que par les possibilités technologiques ou l'expertise des membres de l'équipe de développement destinés à la conception de l'interface.

Toutefois, l'utilisateur final peut être entendu de deux manières :

- **l'utilisateur réel**, le plus susceptible d'utiliser le produit répondant à ses exigences et étant éventuellement déjà utilisateur d'une version précédente du produit
- **l'utilisateur potentiel** qui présente des exigences proches ou équivalentes, et que l'utilisation du produit pourrait l'intéresser.

La norme ISO 13407 définit cinq principes essentiels pour la démarche de conception centrée utilisateur:

- ➔ une prise en compte des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement en amont du cycle de développement ;
- ➔ la participation active des utilisateurs dans la conception, à la fois pour l'évaluation des solutions d'interaction et pour l'identification de leurs besoins et des exigences liées à leurs tâches ;
- ➔ une répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie ;
- ➔ une démarche de conception itérative ;
- ➔ une équipe de conception multidisciplinaire, contenant l'ensemble des acteurs impliqués dans la conception du produit final.

Ces cinq principes sont concrétisés dans une démarche composée de trois phases principales : l'analyse, la conception et l'évaluation. Celles-ci sont reprises en figure 2.10. Les détails concernant chaque étape de ce processus sont présentés dans [127].

Les aspects méthodologiques de la norme ISO 13407 peuvent être appliqués le long du processus de développement en se basant sur un ensemble de techniques tels que les entretiens, les focus groups, l'observation des utilisateurs en situation de travail, etc [94]. Ceci dépend des caractéristiques du projet, des affinités des ergonomes, de la disponibilité des utilisateurs ainsi que des contraintes temporelles et financières.

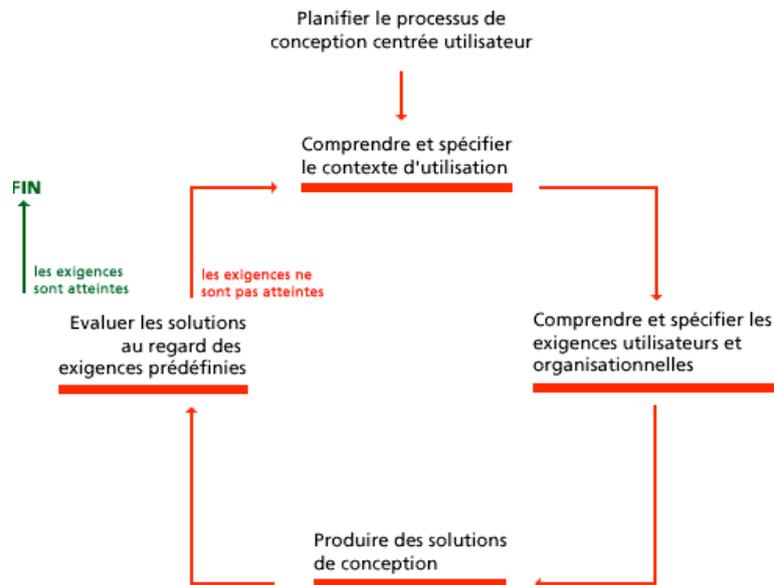


Figure 2.10 Processus de conception centré utilisateur selon la norme ISO 13407.

II.4.2.5 Conception centrée usage

La conception centrée usage est une approche de conception d’interfaces utilisateur dirigée par les modèles, issue des travaux de Constantine et Lockwood [69], [70]. Cette approche est affinée, par la suite, par Norman [135]. Contrairement à la conception centrée utilisateur qui ne propose pas de processus pour en déduire l’interface utilisateur, et se focalisant sur les propriétés sociologiques, psychologiques, ethnologiques, physiologiques, etc, des utilisateurs, la conception centrée usage s’appuie davantage sur les attentes fonctionnelles et les intentions de l’utilisateur et les responsabilités du système [94]. Constantine et Lockwood reprochent à la conception centrée utilisateur de simplifier la démarche de conception à une suite d’essais et de corrections répétés en collaboration avec les utilisateurs [70], [94].

Dans la conception centrée usage, les attentes fonctionnelles de l’utilisateur sont formalisées sous forme de cas d’utilisation essentiels [69], [70], correspondant aux tâches utilisateur et indépendamment des réactions du système. La figure 2.11 décrit un exemple d’un cas d’utilisation, dans le cadre d’un environnement d’exécution de tests logiciels [94]. Ce cas d’utilisation essentiel illustre les intentions de l’utilisateur, selon une décomposition analogue à celle qui pourrait être réalisée à l’aide d’un modèle de tâches.

Running Standard Test	
USER INTENTIONS	SYSTEM RESPONSIBILITIES
	1. show available standard tests
2. pick test	
3. optionally [modify test] }	4. show test configuration
5. confirm & start	6. run test
	7. report results

Figure 2.11 Exemple de cas d’utilisation essentiel [70].

Cette formalisation des tâches utilisateur est ensuite traduite en espaces de travail et interacteurs abstraits. Un exemple d'interface abstraite, déduite du cas d'utilisation essentiel de la figure 2.11, est décrit en figure 2.12 [70]. Nous retrouvons, dans cette figure, les responsabilités du système (montrer la liste des tests disponibles, montrer la configuration du test, indiquer les résultats ou le statut du test) ainsi que des objets d'interaction abstraits qui permettent de réaliser les intentions de l'utilisateur: la liste des tests permet à l'utilisateur de réaliser et de modifier des sélections, exécuter les tests sélectionnés, etc.

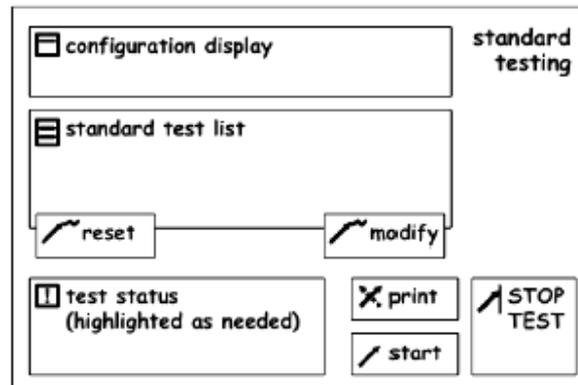


Figure 2.12 Exemple d'interface abstraite [70].

D'autres méthodes ont été développées visant à exploiter à la fois des aspects de la conception centrée utilisateur et des aspects de la conception centrée usage. Cette démarche a été utilisée dans le cadre du projet CAMELEON-RT qui consiste à développer des systèmes interactifs distribués, migrables et plastiques [12]. Ici, la méthode adoptée pour la conception d'interface utilisateur exploite la notion de profilage des utilisateurs, issue de la conception centrée utilisateur, et la notion de modélisation des tâches à différents niveaux d'abstraction issue de la conception centrée usage [94].

II.5 Fusion des pratiques de GL et d'IHM pour le développement des systèmes interactifs mixtes

Les processus de conception des systèmes de réalité mixte apparaissent comme des constructions distinctes des méthodes de développement des systèmes interactifs classiques. En effet, le développement des systèmes interactifs mixtes nécessite la prise en compte des approches, modèles et outils liés aux interactions de réalité mixte (modélisation 3D, multi-modalité, etc.).

II.5.1 Spécificités des systèmes de réalité mixte

Les systèmes interactifs mixtes possèdent des caractéristiques qui les distinguent radicalement des systèmes interactifs traditionnels :

1. Les systèmes de réalité mixte utilisent de nombreux dispositifs hétérogènes, qui sont souvent différents des dispositifs traditionnels constitués du triplet clavier – écran – souris.
2. Chaque application utilise un ensemble spécifique de dispositifs, en fonction de ses fonctionnalités et de son contexte d'utilisation. Ils n'existent donc pas d'infrastructures matérielles et/ou logicielles standardisées pour les systèmes mixtes.
3. Bien que basés sur des dispositifs hétérogènes, certaines fonctionnalités spécifiques au domaine des systèmes mixtes sont récurrentes, tel que la localisation de l'utilisateur ou l'identification d'objets

physiques ayant un rôle dans l'interaction. Toutefois, l'implémentation de ces fonctionnalités et les dispositifs impliqués dans leur réalisation varie en fonction des spécificités de l'application.

4. Les flux de données entre les dispositifs d'entrée et de sortie, et le système et l'utilisateur sont une problématique majeure pour la conception de systèmes de réalité mixte, contrairement aux systèmes interactifs classiques où les entrées sont assurées par le clavier et la souris, les sorties par l'écran ;

La conception des systèmes de réalité mixte s'appuie à la fois sur des modèles et processus génériques du domaine de GL et d'IHM et aussi sur des constructions spécifiques. En effet, la complexité des techniques d'interaction utilisées dans les systèmes de réalité mixte, ainsi que les problématiques d'utilisabilité qu'elles soulèvent, requièrent des expertises, des modèles et des pratiques en conception d'interaction et d'interfaces homme-machine et en ergonomie.

Nous abordons dans les sections suivantes les notations utilisées pour la conception des interfaces de réalité mixte ainsi que les méthodes de conception du domaine de l'interaction homme-machine.

II.5.2 Modèles et outils nécessaires pour la conception de systèmes interactifs mixtes (SIM)

La conception des SIM intègre à la fois des modèles issus de la conception d'interfaces classiques (interfaces WIMP) et des modèles spécifiques à la réalité mixte (appelée également interfaces post-WIMP). Les sous-sections suivantes présentent les modèles classiques tels que les scénarii et les modèles de tâches utilisateurs, et les modèles spécifiques à la réalité mixte tels que les modèles d'interaction.

II.5.2.1 Modélisation sous forme de scénarii

Le concept « scénario » proposée par Carroll [54], [55] est utilisé pour la conception d'interfaces homme-machine. C'est une approche proche de la notion de « cas d'utilisation » telle que décrite par Jacobson [110]. Ce dernier considère les scénarii comme des instances de cas d'utilisation. Ces deux concepts sont similaires sur le fond et présentent des différences sur la forme. En effet, les cas d'utilisation sont généralement plus formels que les scénarii.

Principalement, un scénario est une description d'une facette du système intégrant les composants suivants :

- ➔ Un ou plusieurs agents ou acteurs impliqués dans la réalisation du scénario. Il s'agit d'individus, non pas de systèmes informatiques ;
- ➔ Des buts ou objectifs propres à chaque acteur. Un scénario doit au minimum associer un objectif à un acteur. De plus, les objectifs peuvent évoluer au fil du scénario, en réaction à des actions ou des événements ;
- ➔ Une séquence d'actions ou d'événements définissant le comportement des acteurs ou l'évolution de l'environnement.

Nous présentons un exemple de scénario qui concerne la maintenance automobile. Les différents composants sont identifiés de la manière suivante : L'agent du scénario est le technicien, son but est de réparer le moteur d'une voiture. La séquence d'actions consiste en trois étapes : lancer l'application, localiser la panne, exécuter la procédure de maintenance. Parmi les scénarii qui sont proposés pour la

maintenance automobile, nous décrivons ci-dessous celui correspondant à « mettre à jour une procédure de maintenance » :

“Un réparateur spécialisé, face à l'équipement, observe une nouvelle panne non répertoriée dans la liste des pannes. Ce réparateur décrit une nouvelle tâche de maintenance correspondante à la nouvelle panne. Si nécessaire, il prend des photos et / ou vidéos de la panne si elle est visible à l'opérateur”.

II.5.2.2 Modélisation basée sur l'analyse de la tâche de l'utilisateur

Plusieurs modèles ont été proposés pour décrire les activités (actions) de l'utilisateur sur un système interactif. Les premiers modèles d'Interaction Homme-Machine tels que GOMS (Goals, Operators, Methods, and Selection rules) [53] et UAN (User Action Notation) [99] modélisent les actions physiques élémentaires de l'utilisateur.

Une autre génération de modèles s'est basée sur la description d'interaction à un plus haut niveau d'abstraction, en considérant les intentions de l'utilisateur comme point de départ pour modéliser les actions physiques sur le système. Parmi ces modèles, nous citons les notations MAD (Modèle Analytique de Description de tâches) [163], CTT (Concur Task Trees) [142] et K-MAD (k signifie Kernel) [62]. Ces notations sont proches dans leur façon de décrire les tâches [94]:

- ces modèles proposent une décomposition hiérarchique et pyramidale des tâches, d'où la dénomination « arbre de tâches ». Cette décomposition commence de la tâche la plus abstraite (tâche racine) jusqu'aux niveaux les plus concrets;
- aucune limite n'est imposée au concepteur quant au niveau de raffinement maximal des modèles : il est possible de se limiter aux tâches abstraites (intentionnelles) ou bien de préciser les actions élémentaires de l'utilisateur ;
- Les modèles permettent de décrire, en plus des tâches physiques de l'utilisateur, les tâches de communication avec le système et les réactions du système ;
- à un même niveau d'abstraction, les tâches sont liées entre elles par des opérateurs temporels (parallélisme, séquençement, etc.) et des opérateurs conditionnels (tâches déclenchées à la suite d'une autre, tâches en alternative, etc.) ;
- chaque modèle propose différents types de décorations permettant d'enrichir la sémantique des arbres de tâches.

Dans notre étude, nous adoptons le modèle CTT pour la modélisation des tâches utilisateur pour les systèmes de réalité mixte. Ce modèle peut être considéré, à ce jour, comme le plus répandu. Notons qu'une étude comparative, entre le modèle CTT que nous avons adopté et les autres modèles présentés dans cette section, a été effectuée dans [51] et [64].

L'exemple ci-dessous (cf. Figure 2.13) présente un exemple d'arbre de tâches « mettre à jour une procédure de maintenance ».

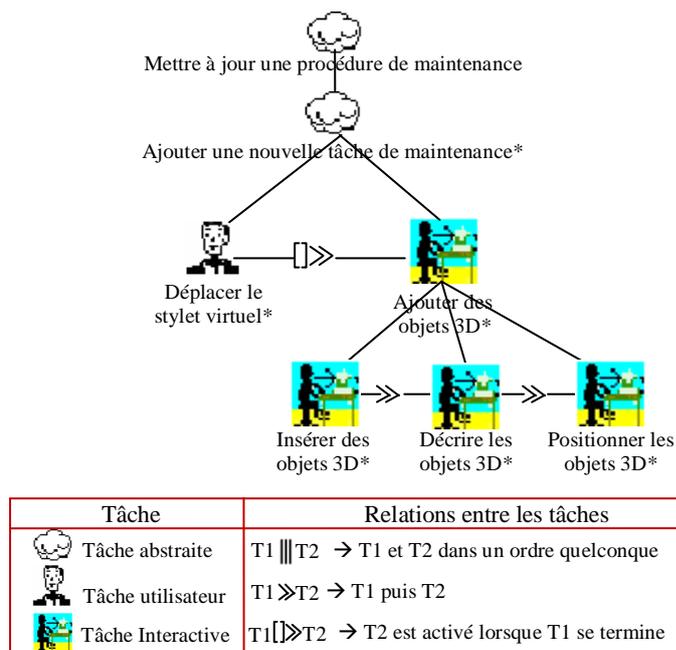


Figure 2.13 Diagramme de tâches utilisant le formalisme CTT.

II.5.2.3 Modélisation de l'interaction utilisateur-système

Les systèmes de réalité mixte sont caractérisés par l'interaction de l'utilisateur avec des objets physiques et numériques de l'interface du système. Ainsi, des notations spécifiques aux SIM sont nécessaires afin de décrire l'organisation des dispositifs et des flux de données. Les notations les plus utilisées pour décrire les SIM sont données comme suit : diagrammes ASUR [85], IRVO [59], MIM [73] et formalisme de Renevier [150].

Notre étude porte sur une interface de réalité mixte utilisant le formalisme IRVO [59]. Ce modèle permet essentiellement au concepteur de décrire les relations conceptuelles entre les entités physiques et numériques, les modalités utilisées par l'utilisateur, les relations physiques entre les dispositifs qui supportent les modalités et les mécanismes de coopération/collaboration entre les utilisateurs. Ce dernier aspect est l'un des points forts du modèle IRVO qui le distingue des autres modèles.

En se basant sur les travaux présentés dans [58], [64] et [93], une étude comparative a été menée entre IRVO et d'autres modèles tels que ASUR, MIM, et le formalisme de Renevier. IRVO se distingue par les caractéristiques suivantes:

- Les sens de perception et d'action d'un utilisateur sont explicitement représentés. Cette information est importante car elle permet de visualiser immédiatement les sens lors de l'interaction avec le système.
- Les objets mixtes (physiques et numériques) sont clairement identifiables en mettant en évidence la relation d'augmentation.
- La perception augmentée est représentée sous la forme de fusion des objets réels et virtuels.
- L'aspect « coopération/collaboration » entre les utilisateurs du système est clairement formalisé.

Présentation du modèle IRVO

Les composants d'IRVO contiennent la sémantique nécessaire à la conception et au développement de systèmes interactifs mixtes.

Entités du modèle IRVO [58]

Le modèle IRVO différencie quatre (4) catégories d'entités:

- l'utilisateur (U), ou plus généralement les utilisateurs pour des systèmes coopératifs et collaboratifs,
- les objets manipulables et/ou perceptibles par les utilisateurs. Ils sont divisés en deux (2) sous-catégories:
 - l'objet du domaine de la tâche (O = *Objet*) : il s'agit soit d'un objet physique, soit de données informatiques représentées sous une forme externe perceptible, c'est-à-dire des objets virtuels.
 - les outils (T = *Tool* en anglais) : ils participent à la réalisation de la tâche en permettant à l'utilisateur d'agir sur d'autres outils ou sur des objets du domaine de la tâche.
- le modèle interne de l'application (M) qui représente l'application informatique privée de la couche de présentation concrète.
- Les transducteurs : pour communiquer entre les mondes réels et virtuels, l'information provenant du monde réel doit être transformée en données numériques, ce qui est réalisé par des senseurs (S) (capteurs); l'opération inverse est réalisée par des effecteurs (E) ou actuateurs.

Relations entre les entités [58]

Les relations, matérialisées par des flèches, représentent l'échange d'informations entre deux entités. Pour un utilisateur, cela peut être une action (flèche partant de U) ou une perception (flèche arrivant à U). Un utilisateur est principalement caractérisé par les canaux de communication qu'il peut utiliser comme le canal Visuel (V), le canal audio (A) et le canal kinesthésique/haptique (KH) (cf. Figure 2.14). Une relation peut aussi représenter une communication entre deux (2) utilisateurs.

Les relations outils - objets, indiquées par des flèches, représentent les actions des outils sur les objets. Une relation représentée par une ligne pointillée signifie que la relation existe mais qu'elle est peu importante vis-à-vis de la tâche courante (par exemple le retour haptique d'une souris n'est pas important pour la déplacer de droite à gauche ou de bas en haut car le feedback est principalement assuré par la vision du pointeur sur l'écran).

Enfin, les transducteurs sont traversés par les différentes relations. Ces transducteurs permettent de changer la nature de l'information (réel → virtuel ou virtuel → réel) mais ne touchent pas à la sémantique. Par exemple les mouvements d'un stylo sur des pages sont transformés en coordonnées x et y dans le monde virtuel. La figure 2.14 décrit l'Interaction Homme-Machine pour une application de maintenance à distance (ou e-maintenance). Le technicien qui manipule, en utilisant sa main, un outil (flèche partant de U (technicien) vers Tr (outil réel)) est entrain de réparer la machine (flèche Or (objet réel)→Tr (outil réel)). Le technicien communique avec l'expert distant en utilisant la modalité orale (A→A) pour obtenir l'aide nécessaire sur la tâche à réaliser. De plus, le technicien qui est doté d'une caméra (S), pour capturer la scène où se trouve l'équipement, visualise, via un écran (E), la tâche de maintenance augmentée, directement positionnée sur le lieu de réparation.

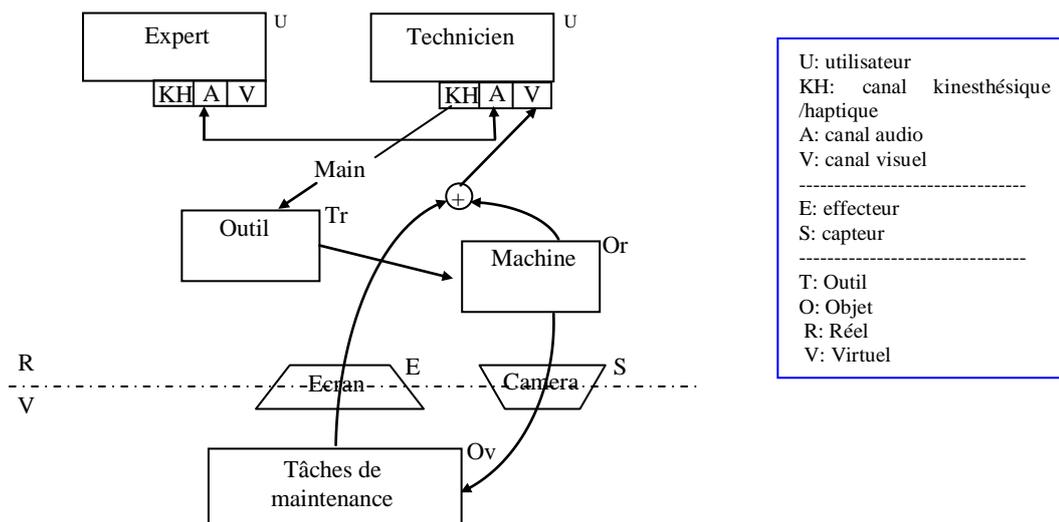


Figure 2.14 Modèle IRVO pour une application de e-maintenance.

II.5.3 Méthodes de développement des systèmes interactifs mixtes

Dans le cadre de conception des SIM, plusieurs approches et méthodes ont été proposées. Elles sont essentiellement basées sur la fusion des pratiques des méthodes de GL (cf. Section II.4.1) et d'IHM (cf. Section II.4.2) en y intégrant les spécificités de la réalité mixte.

Concernant les approches proposées pour les SIM, nous pouvons citer les modèles à composants logiciels [18], les patrons de conception [148], les boîtes à outils [90], [113], les notations de conception [59] et les méthodes informelles [39].

Malgré l'apport de ces approches, elles se focalisent uniquement sur certains aspects des SIM, comme la modélisation de l'interaction ou le développement logiciel. Ces approches ne couvrent pas tout le cycle de développement d'un système interactif mixte. En outre, l'utilisabilité du système final n'a pas été suffisamment considérée.

De ce fait, les chercheurs s'orientent de plus en plus vers des méthodologies de développement, pour la conception des SIM, plutôt qu'aux approches qui sont jugées insuffisantes. Dans ce qui suit, nous présentons les méthodes les plus connues dans le cadre de la conception des SIM.

II.5.3.1 Méthode de développement des SIM collaboratifs et mobiles

Les travaux de Renevier [150] abordent à la fois la conception des systèmes interactifs mixtes, des systèmes collaboratifs et des systèmes mobiles. La démarche (cf. Figure 2.15) consiste à concevoir des scénarii basés sur l'analyse de la tâche réelle (observation par les ergonomes logiciels du travail de l'utilisateur et explication par ce dernier des phases pertinentes de son travail) et des scénarii provenant de l'analyse de l'activité (observation par les ergonomes logiciels et enregistrement vidéo de l'activité de l'utilisateur sur site, par exemple). À partir de ces scénarii, un ensemble de besoins pour la spécification du futur système est établi, puis fixés sous forme de scénarii projetés abstraits. Enfin, les fonctionnalités sont identifiées et intégrées dans des scénarii projetés concrets. Les techniques d'interaction sont conçues en fonction des spécifications des fonctionnalités lors de l'élaboration des scénarii projetés concrets. Enfin, des évaluations sont réalisées pour valider les propriétés fonctionnelles du système et son utilisabilité.

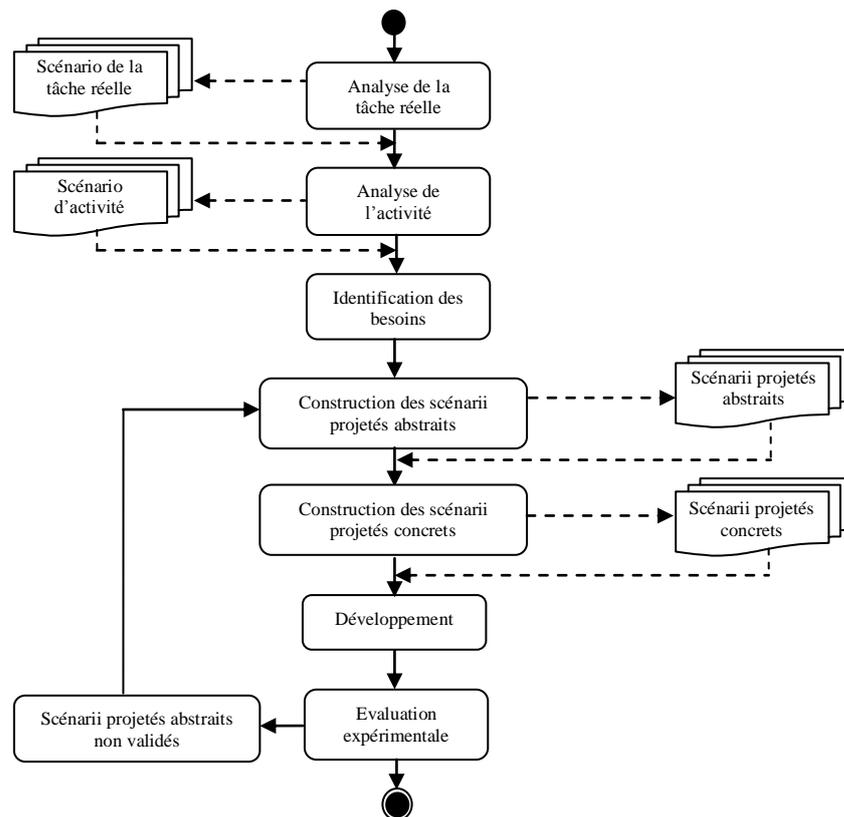


Figure 2.15 Méthode de développement pour les systèmes interactifs mixtes [150].

II.5.3.2 Méthode de développement des SIM basée sur une approche ergonomique

L'approche de conception des systèmes interactifs mixtes proposée dans [63] est basée sur l'insertion des recommandations ergonomiques dans le processus de conception, et ceci, en trois étapes (cf. Figure 2.16) : définition des besoins utilisateur, description des tâches utilisateur et modélisation de l'interaction. Les deux premières étapes s'appuient sur la notation K-MAD, décrite par Charfi [62]. L'étape de modélisation de l'interaction utilise le modèle ASUR [85].

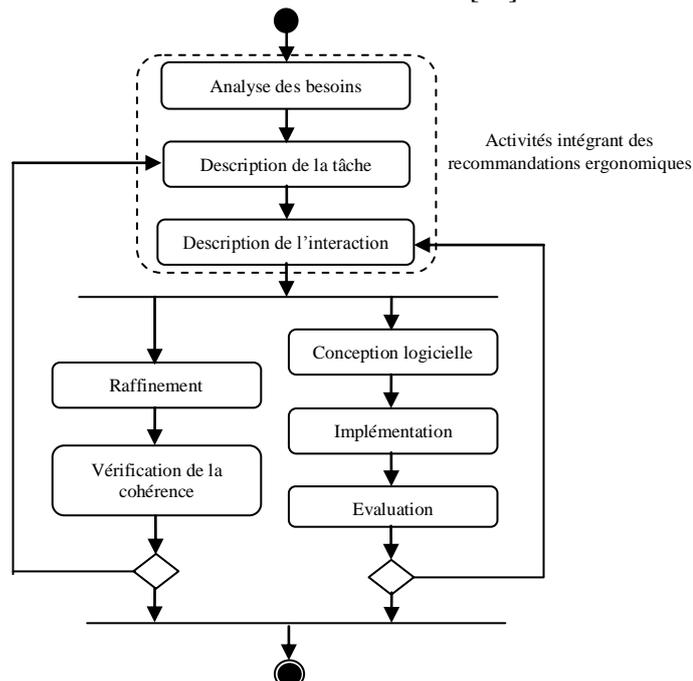


Figure 2.16 Méthode de développement des SIM selon Charfi [63].

Les méthodes proposées par Charfi et Renevier est une succession de démarches basées sur les recommandations ergonomiques, les scenarii et des fragments de processus non formalisés. Ces méthodes sont plus orientées vers la conception de l'interaction plutôt qu'à l'utilisation d'un processus de développement formalisé depuis l'expression de besoins jusqu'à l'évaluation.

II.5.3.3 Méthode basée sur le couplage de la conception et de l'implémentation

Gauffre [93] adopte une approche qui vise à établir des liens entre plusieurs modèles, supports au processus de développement des SIM. Il propose des transformations (modèle ASUR-IL) afin d'assurer le lien entre les modèles de conception ASUR et l'environnement d'implémentation « WComp » et « Open-Interface » (cf. Figure 2.17). Cette méthode permet, également, d'intégrer des choix de conception et des connaissances relatives au développement des SIM, aux environnements utilisés et aux technologies disponibles. De plus, des composants sont introduits pour garantir la cohérence entre les composants de la phase conception et de la phase implémentation.

Entre ASUR et ASUR-IL, la transformation permet d'initialiser la conception de l'architecture logicielle en identifiant les modules et les communications nécessaires. La transformation permet également d'identifier des modules particuliers à partir d'informations contenues dans un modèle source ASUR.

Ces différents modules sont ensuite utilisés pour assurer le passage vers les environnements d'exécution. Il s'agit de transformer un assemblage de composants ASUR-IL en un assemblage conforme à l'un des méta-modèles des environnements ciblés.

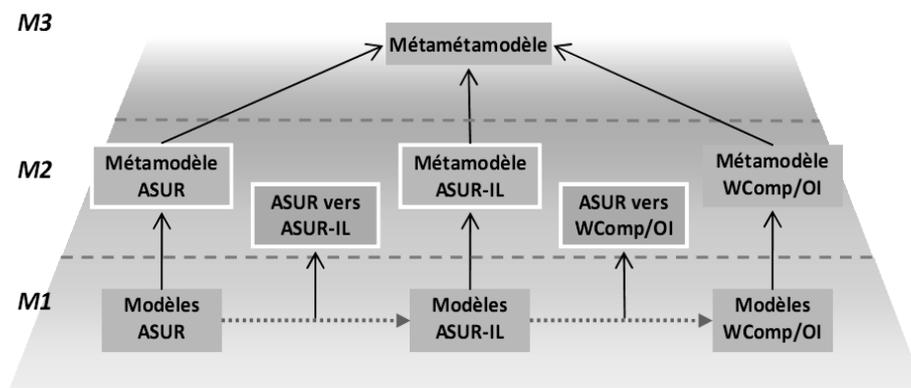


Figure 2.17 Organisation pyramidale de l'approche proposée par Gauffre [93] pour le développement des SIM.

Cette méthode propose un mécanisme de transformation de modèles depuis la modélisation jusqu'à l'implémentation. Cependant, elle n'intègre pas les besoins et les attentes des utilisateurs. Ainsi, les problèmes d'utilisabilité ne sont pas pris en considération. Concrètement, cette approche se focalise principalement sur la modélisation de l'interaction et sa traduction vers la phase implémentation.

II.5.3.4 Méthode de développement des SIM basée sur les modèles d'architecture logicielle

Zenati-Henda [188] propose d'utiliser le modèle d'Architecture «PAC-Amodeus», qui représente une formalisation hybride du modèle d'architecture logicielle "Arch" avec une approche multi-agent, pour le développement des systèmes réalité augmentée. Le modèle PAC-Amodeus a été utilisé pour intégrer certaines spécificités de la réalité augmentée dans le cadre de la maintenance industrielle. Il s'agit de décrire les spécifications externes de la réalité augmentée, en termes d'interface, après avoir utilisé le modèle PAC-Amodeus (cf. Figure 2.18). Ce modèle assure une séparation entre le noyau fonctionnel qui implémente les concepts propres au domaine de la maintenance, et l'interface qui présente ces concepts à l'utilisateur en lui permettant de les manipuler.

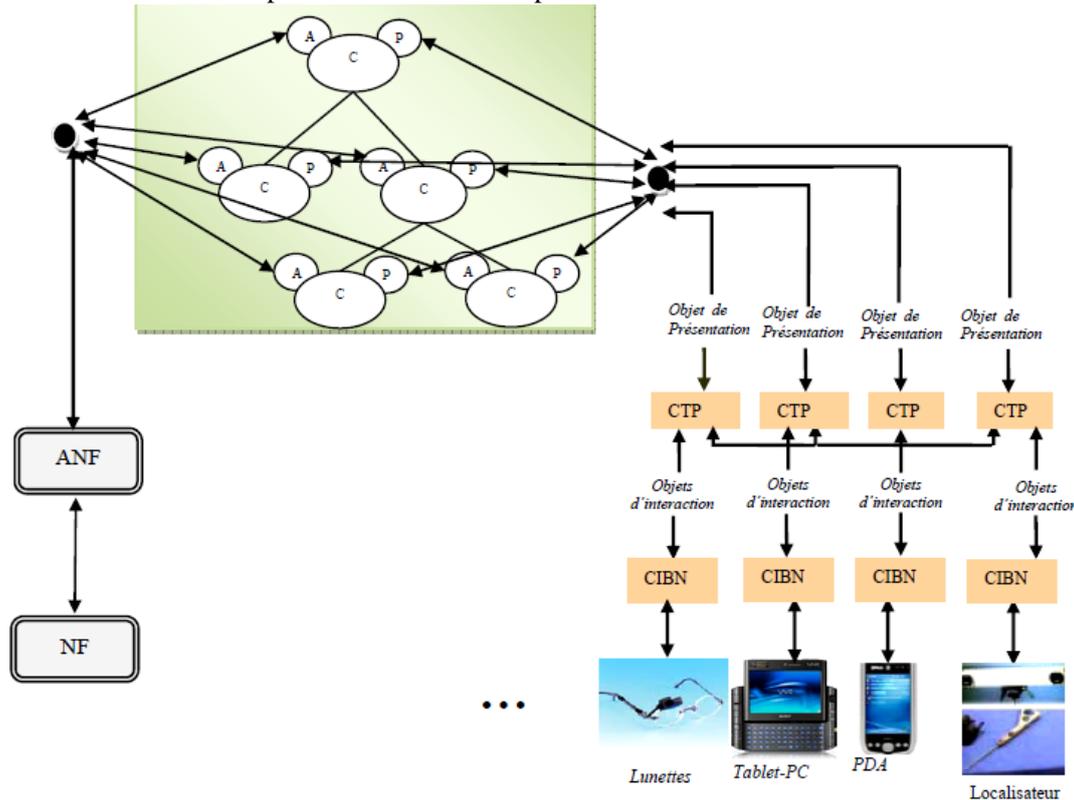


Figure 2.18 Adaptation du modèle d'architecture PAC-Amodeus pour le développement d'un système de réalité augmentée [188].

Malgré l'apport de cette approche du point de vue logiciel, elle présente des limites. D'abord, cette démarche ne prend pas en compte certains aspects propres à la réalité augmentée tels que le suivi/recalage, le rendu temps réel, etc. Aussi, les phases en amont du processus de développement telles que la spécification des besoins et l'analyse ne sont abordées. Par conséquent, les besoins des utilisateurs ne sont pas intégrés dans la méthode. Cette dernière se focalise uniquement sur la conception logicielle utilisant une démarche d'implémentation classique.

II.5.3.5 Méthode Symphony pour la conception des SIM

Godet-Bar dans [94] se base sur les bonnes pratiques visant à intégrer les aspects de GL et d'IHM dans une méthode de développement des systèmes de réalité augmentée. Il propose un ensemble de principes pour intégrer les spécificités de la réalité augmentée, du point de vue interface, dans le processus de développement. Il utilise la méthode Symphony et le modèle UML tripartite comme supports pour intégrer les modèles issus des pratiques d'IHM [94], [95].

Quatre principes ont été, donc, introduits dans la méthode Symphony pour les systèmes de réalité augmentée [94], [95] (cf. Figure 2.19) : (1) intégration harmonieuse des pratiques de GL et d’IHM, (2) activités collaboratives de conception, (3) modèles traçables et cohérents pour la collaboration et la communication et (4) outillage omniprésent.

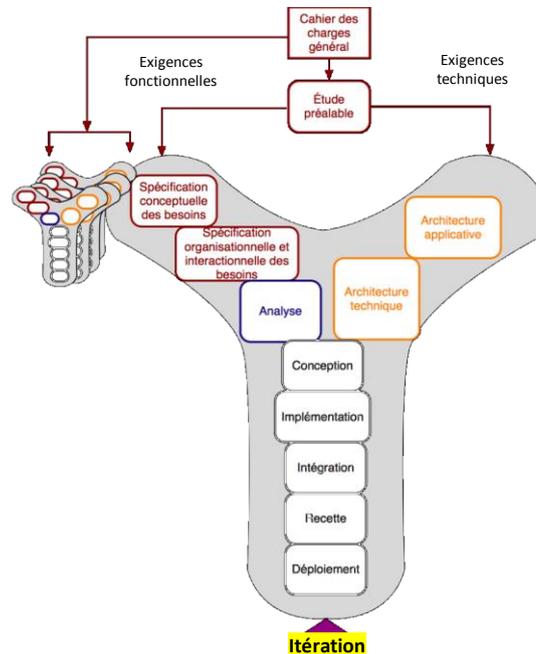


Figure 2.19 Extension de la méthode Symphony pour le développement des systèmes de réalité augmentée [95].

La méthode proposée a été appliquée pour la gestion des états des lieux de l’immobilier. Ce système se focalise, principalement, sur la visualisation de données sous forme d’augmentation (ex. indiquer le lieu de dommage dans une pièce à l’intérieur d’une location).

Néanmoins cette méthode présente certaines limitations :

1. Prise en compte des objets d’interaction propres à la réalité augmentée. La méthode n’a, cependant, pas été généralisée au cas des systèmes interactifs mixtes où d’autres objets et propriétés doivent être considérés, tels que les interactions entre l’utilisateur et l’interface (interactions 2D/3D), les spécificités de la virtualité augmentée, etc.

2. Dans le domaine de GL, les équipes de développement sont plutôt orientées vers l’utilisation des cycles de développement issus des processus unifiés plutôt qu’aux méthodes spécifiques telle que la méthode Symphony. Ainsi, une phase préliminaire d’apprentissage s’impose afin de se familiariser avec la méthode.

D’une manière générale, les industriels et équipes de développement sont peu familiers avec des méthodes de développement spécifiques. Ils prétendent, souvent, à des méthodes où tous les acteurs de l’entreprise peuvent être impliqués.

3. L’étude de cas présentée montre que l’utilisation du diagramme UML tripartite pour la modélisation des artefacts et des produits de la méthode Symphony, est lourde pour le nombre de modèles utilisés pour représenter les espaces fonctionnels et les espaces d’interaction. Ce problème devient plus important lorsque cette méthode est utilisée pour le développement d’applications industrielles.

En effet, la structuration des processus métier en composants métier, entités métier et données de référence [94] est parfois laborieuse et nécessite une activité dense des spécialistes de GL et d’IHM.

4. Les aspects liés à la réalité augmentée comme le suivi et le recalage réel/virtuel sont considérés d'un point de vue technique. Ceci ne nous permet pas d'avoir suffisamment d'informations concernant l'intégration de ces aspects dans le processus de développement. Par exemple, la méthode de suivi utilisée n'a pas été représentée dans la phase d'analyse au niveau des modèles statiques et dynamiques. Nous constatons l'absence de modèles permettant l'intégration de ces aspects dans le processus de développement.

5. L'aspect "multi-utilisateurs" et plus largement l'aspect « coopératif/collaboratif », n'a pas été considéré dans la méthode Symphony. L'application développée se focalise uniquement sur un seul utilisateur qui interagit avec le système de réalité augmentée. Le diagramme ASUR utilisé pour modéliser l'interaction de réalité augmentée, n'offre pas de formalisme pour décrire les systèmes interactifs avec plusieurs utilisateurs.

6. Le choix des experts et l'attribution des tâches ont été choisis du point de vue GL. Du point de vue IHM, il n'y a pas de distinction entre les experts IHM et ergonomes. La communauté IHM indique que l'expert IHM possède des connaissances sur les aspects psychologiques (cognitifs ou sociaux) de l'utilisateur. D'autre part, l'expert d'utilisabilité (ou l'ergonome) participe à la conception de l'interface. Pour cela, les deux rôles sont considérés comme une seule entité et pouvant être attribués à une seule personne « expert IHM ».

L'approche adoptée par Godet-Bar [94], sur le partage des rôles et la désignation d'experts, a été élaborées du point de vue de la communauté GL. Elle est considérée comme une vue biaisée de celle établie par la communauté IHM.

7. La relation entre la conception et l'implémentation est effectuée par l'intermédiaire du logiciel spécifique Sonata [94]. Ce dernier n'est pas accessible au grand public et difficilement exploitable par les équipes de développement novices. Ceci nécessite une période d'apprentissage et d'adaptation.

II.5.3.6 Méthode de développement d'applications de réalité augmentée de J. M. Cieutat

Cette méthode a été proposée initialement par Olivier Hugues [107] pour la conception d'un Système d'Information Géographique (SIG) basé sur la RA pour la sécurité maritime pour la Société Nationale de Sauvetage en Mer (SNSM). Elle a été ensuite utilisée par J. M. Cieutat [67] pour développer un système de RA pour l'entraînement à l'apprentissage d'un geste technique telle que la soudure.

L'approche préconisée consiste à coupler la méthode d'analyse ergonomique développée dans [163] avec la méthode de développement RUP (Rational Unified Process).

La méthode proposée se focalise, principalement, sur les étapes suivantes :

1. Définition des situations à observer ;
2. Observations et entretiens de ces situations ;
 - (a) Observations en situation des tâches réelles ;
 - (b) Verbalisation des tâches par entretiens hors situations ;
3. Analyse de ces observations et de ces entretiens ;
4. Elaboration d'un modèle de tâches basé sur la notation MAD (Méthode Analytique de Description de tâches) [161] ;
5. Détermination des informations nécessaires pour la complétion des tâches ;
6. Description des informations et des nouvelles fonctionnalités à introduire permettant de faciliter la complétion des tâches en utilisant des diagrammes de cas d'utilisation d'UML ;

7. À partir des diagrammes de cas d'utilisation, déployer la méthode RUP jusqu'à la réalisation du système ;

8. Phase de test basée sur les retours utilisateurs.

Cette méthode a été testée sur un cas pratique, mais aucune indication n'a été fournie sur la façon dont les objets de réalité augmentée ont été modélisés. En plus, aucune formalisation n'a été présentée pour la description du modèle d'interaction à partir du modèle de tâches. Aussi, l'application de la méthode RUP avec l'enchaînement des différentes phases et le séquençage des différents produits de la méthode n'a pas été explicitée.

La conception puis l'implémentation de l'IHM, dans la méthode RUP, se base sur l'établissement d'un prototype. Ce rôle est attribué au spécialiste GL. L'absence de spécialiste IHM compromet l'intégration des spécificités de la réalité augmentée dans le processus de développement, d'une part.

D'autre part, la méthode RUP n'intègre pas de collaboration explicite entre les acteurs du développement. Par conséquent, ils n'existent pas de mécanismes de synchronisation entre les différents spécialistes.

Pour la modélisation des tâches, les auteurs se sont contentés à l'utilisation de la notation MAD, bien que cette dernière ait été raffinée en un modèle plus représentatif (notation K-MAD [64]) pour décrire les tâches dans le cadre de la réalité augmentée.

II.6 Synthèse et discussion

Les méthodes et approches proposées ont contribué au développement des applications de réalité mixte puisque plusieurs recherches ont été engagées et abouties, par la suite, à des prototypes logiciels, répondant à un certain nombre de besoins. Le tableau 2.2 ci-dessous donne un aperçu sur quelques méthodes de développement les plus connues pour les systèmes de réalité mixte.

Tableau 2.2. Synthèse de quelques méthodes de développement des SIM

Méthodes et approches pour les SIM	Modèles IHM utilisés	Type de systèmes	Domaines d'application
Méthode de développement des SIM collaboratifs et mobiles de Renevier [150].	- Scenarii, - Arbres de tâches.	Réalité Mixte	Archéologie
Méthode de développement des SIM basée sur une approche ergonomique de Charfi [63].	- Arbres de tâches, - Modèles d'interactions.	Réalité Mixte	Sciences naturelles
Méthode basée sur le couplage de la modélisation et de l'implémentation de Gauffre [93].	- Modèles d'interactions, - Modèles d'architectures logicielles.	Réalité Mixte	TIC
Méthode de développement des SIM basée sur les modèles d'architectures logicielles de Zenati-Henda [188].	- Modèles d'architectures logicielles.	Réalité Augmentée	Maintenance
Méthode Symphony pour la conception des SIM de Godet-Bar [94].	- Scénarii - Arbres de tâches, - Modèles d'interactions,	Réalité Augmentée	Immobilier
Méthode de développement d'applications de réalité augmentée de J. M. Cieutat [67].	- Arbres de tâches	Réalité Augmentée	Industrie et maintenance

Malgré cet apport méthodologique, ce domaine n'a pas encore atteint sa maturité pour aboutir à des applications industrialisées, notamment dans la maintenance. Dans ce contexte, nous avons constaté que les approches proposées présentent plusieurs limites entraînant des efforts supplémentaires à entreprendre dans la modélisation et l'intégration des spécificités des SIM dans les méthodes de développement. L'intérêt est de rendre l'utilisation de ces nouveaux paradigmes d'interactions plus courante dans l'industrie.

Ainsi, nous pouvons constater l'enjeu des technologies émergentes dans l'amélioration des performances des acteurs dans la réalisation de leurs tâches (cf. Chapitre 1). De ce fait, nous jugeons que la mise en place d'une méthode de développement pour l'intégration de ces technologies et des nouveaux paradigmes d'interaction au système d'information est nécessaire, et ceci, afin d'avoir des produits logiciels de haute technologie commercialisables et utilisables pour l'assistance à la maintenance. Dans ce cas, nous nous sommes basés sur les bonnes pratiques et approches proposées pour le développement des SIM, que nous avons présentées dans ce chapitre, pour proposer notre méthode de développement.

II.7 Conclusion

Nous avons constaté que les méthodes de développement proposées dans la littérature ont contribué à la mise en œuvre des systèmes interactifs. Dans le domaine de la maintenance, les systèmes interactifs d'aide développés, jusqu'à présent, sont rarement utilisés dans l'industrie. Ils ont été conçus sous forme de prototypes issus des laboratoires et sont dépourvus de toute information provenant des besoins des utilisateurs, du contexte de l'entreprise et des objectifs de la maintenance. Cette situation a fait que ces prototypes ne peuvent pas être adoptés par les industriels.

Notre objectif est, donc, de proposer une méthode permettant de concevoir des systèmes interactifs d'aide à la maintenance en répondant aux différents besoins et contraintes du processus de maintenance dans l'industrie. Pour atteindre cet objectif, nous avons proposé, dans le chapitre suivant, une approche pour intégrer les spécificités des nouveaux paradigmes d'interaction, le contexte industriel et les besoins des opérateurs, dans les méthodes de développement.

Ainsi, nous présentons, dans le troisième chapitre, notre méthode de développement des systèmes interactifs mixtes pour l'aide à la maintenance. En effet, nous avons réalisé une extension de la méthode 2TUP, issue du domaine de Génie Logiciel, dans laquelle nous avons intégré les spécificités des SIM.

Deuxième partie

Contribution

Chapitre III Méthode 2TUP étendue : support méthodologique pour le développement des SIM appliqué à la maintenance industrielle

III.1 Introduction

Nous avons présenté dans le précédent chapitre différentes méthodes de développement pour les systèmes de réalité mixte. Ces méthodes constituent, principalement, le résultat de l'unification des pratiques issues des domaines de Génie Logiciel (GL) et de l'Interaction Homme-Machine (IHM). Nous avons, dans notre étude, capitalisé les différentes propositions en termes de modèles et d'approches afin d'introduire une méthode permettant de concilier les pratiques des deux domaines dans le cadre des systèmes interactifs mixtes. Nous adoptons une approche permettant d'utiliser les bonnes pratiques des deux domaines en y ajoutant les spécificités des systèmes de réalité mixte. C'est dans cette optique que notre choix est porté sur la méthode 2TUP [155].

Depuis quelques années, la méthode 2TUP [155], issue des bonnes pratiques du Génie Logiciel, est au centre de plusieurs collaborations entre universités, centres de recherche, ministères et industries. Dans ce cadre, des projets ambitieux (informatisation du système d'information hospitalier du CHU de Blida [4], e-commune de Baba-Hassen [33]) ont été réalisés. De plus, cette méthode est largement utilisée par les étudiants en fin de cycle [4], [9], [97] pour réaliser des prototypes de laboratoires ainsi que des projets industriels.

Cette méthode permet de prendre en considération les spécificités des systèmes interactifs mixtes plus tôt dans le processus de développement. De ce fait, nous avons utilisé la méthode 2TUP [155] comme support pour concilier les deux domaines GL et IHM dans le cadre de la conception des systèmes interactifs mixtes pour l'aide à la maintenance. Dans ce sens, nous devons permettre à des acteurs et spécialistes, de cultures et pratiques différentes, de collaborer afin de mettre en œuvre un système interactif répondant aux besoins de la maintenance dans un contexte industriel.

Nous présentons dans ce chapitre notre méthodologie de conception pour les systèmes de réalité mixte. Nous introduisons la méthode 2TUP étendue afin de répondre aux objectifs suivant : (1) enrichir les besoins fonctionnels des utilisateurs et (2) proposer une application utilisable et intégrable dans le système d'information d'entreprise.

III.2 La méthode 2TUP

La méthode 2TUP (*2 Tracks Unified Process*, en anglais) est un processus UP (*Unified Process*, en anglais) construit sur la base du langage de modélisation universelle "UML" [155]. Cette méthode répond aux mêmes caractéristiques que la méthode UP, c'est-à-dire, itérative et incrémental, orientée utilisateur et pilotée par les cas d'utilisation [155]. En plus, la méthode 2TUP est utilisée dans des projets de différentes tailles.

Principalement, le terme « 2 Tracks » signifie littéralement que le processus suit deux chemins. Il s'agit des chemins « fonctionnel » et « technique ». À l'issue des évolutions du modèle fonctionnel et

de l'architecture technique, la réalisation du système consiste à fusionner les résultats des deux branches. Cette fusion conduit à l'obtention d'un processus de développement en forme de Y [155], comme illustré par la figure 3.1. Ainsi, la méthode classique 2TUP est organisée en trois branches de conception:

1. **La branche fonctionnelle** (à gauche) capitalise la connaissance du métier de l'entreprise indépendamment des technologies utilisées. Cette branche comporte les étapes suivantes : la capture des besoins fonctionnels qui produit un modèle des besoins focalisé sur le métier des utilisateurs, l'étape d'analyse qui consiste à étudier précisément la spécification fonctionnelle de manière à avoir une idée de ce que va réaliser le système en matière de métier.

2. **La branche technique** (à droite) capitalise un savoir-faire technique. Les techniques développées pour le système peuvent être en effet indépendantes des fonctions à réaliser. Cette branche comporte les étapes suivantes : la capture des besoins techniques qui recense toutes les contraintes et les choix dimensionnant la conception du système et les outils et les matériels sélectionnés, la conception générique qui définit les composants nécessaires à la conception de l'architecture technique. L'architecture technique construit le squelette du système informatique et écarte la plupart des risques de niveau technique.

3. **La branche centrale** permet de fusionner les résultats des deux branches. Cette fusion conduit à l'obtention d'un processus en forme de Y. Cette branche comporte les étapes suivantes : la conception préliminaire qui intègre le modèle d'analyse dans l'architecture technique de manière à tracer la cartographie des composants du système à développer, la conception détaillée qui étudie ensuite comment réaliser chaque composant, l'étape de codage qui produit ces composants et teste au fur et à mesure les unités de code réalisées et la phase de recette qui consiste enfin à valider les fonctions du système développé.

Notons qu'une phase d'**étude préalable** est nécessaire, dont les objectifs sont de réaliser une modélisation des processus métier existants, sous forme de cas d'utilisation, et d'identifier les acteurs impliqués dans l'utilisation du produit final.

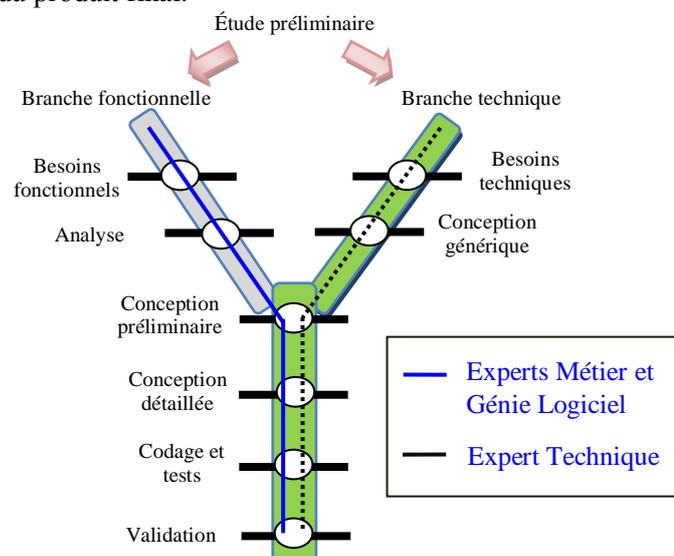


Figure 3.1 Méthode 2TUP originale [155].

III.2.1 Propriétés de la méthode 2TUP

L'objectif de cette méthode est d'établir une étude du métier de l'entreprise, en préalable à toute activité de développement informatique. Cette étude doit permettre notamment de déterminer à la fois les processus métier essentiels de l'entreprise, des objets métier autour desquels ils s'organisent, et les acteurs externes du métier impliqués dans la réalisation du processus.

Un processus métier (ou processus fonctionnel) est défini par Kettani [114] comme « l'ensemble des activités internes d'un métier dont l'objectif est de fournir un résultat observable et mesurable pour un utilisateur individuel du métier ».

Les acteurs externes du processus métier peuvent être définis comme les entités (personnes ou systèmes) extérieures au système (ou à l'entreprise) interagissant avec celui-ci (ou celle-ci) [100].

Les processus métier, organisés sous forme de cas d'utilisation et définis en amont de la méthode, représente un point essentiel pour la traçabilité des produits du développement.

Chaque artefact conçu au cours du cycle en Y est en effet relié à un cas d'utilisation par une relation de dépendance parmi les trois types : « est spécifiés par », « est réalisé par » et « est implémenté par » [111].

La méthode 2TUP est focalisée sur les besoins techniques en plus des besoins fonctionnels. La prise en compte, plutôt, des exigences techniques, est particulièrement adaptée aux systèmes de réalité mixte caractérisée par des besoins techniques, du point de vue matériel et logiciel, spécifiques. En outre, les propriétés de la méthode 2TUP réside dans la traçabilité des artefacts, permettant aux équipes de développement d'opérer des changements au niveau fonctionnel et/ou technique lors de l'intégration des spécificités des systèmes de réalité mixte.

D'autre part, la méthode 2TUP est caractérisée par sa facilité d'adaptation à l'évolution des contraintes imposées par le système d'information de l'entreprise. Elle permet, ainsi, de gérer les risques à la fois techniques et fonctionnels. Mais le point fort de la méthode réside dans l'intégration d'une approche fonctionnelle [155] centrée sur les composants métier qui peuvent eux aussi se décomposer en objets métier. 2TUP offre la possibilité d'obtenir des composants métier réutilisable et peu complexe.

La méthode 2TUP utilise le concept "d'Objets Métier (OM)" ou "Objets Fonctionnels (OF)" qui représente une décomposition d'un processus métier [155]. Les *OM* sont d'abord identifiés et organisés au cours de la phase de spécification fonctionnelle des besoins. L'organisation des *OM* est raffinée au cours de la phase d'analyse et décrite sous la forme d'une structure UML. Ceci met en évidence les services offerts par l'*OM*, sa structure interne et les objets auxquels il est lié.

À la suite des phases de spécification, le système est vu comme un assemblage d'Objets Métier (OM) indépendants et interconnectés. Cette pratique garantit une bonne modularité des spécifications et facilite leur réutilisation. Dans les phases ultérieures (conception et implémentation) de la branche centrale du processus en «Y», ces Objets Métier sont progressivement transformés en "OM" logiciels par l'intégration des choix techniques spécifiés dans les objets et composants techniques.

III.2.2 Limites de la méthode 2TUP

Sous la forme présentée ici, la méthode 2TUP ne décrit le développement de l'IHM que lors de la réunion des branches fonctionnelle et technique. Ce développement, consiste, à réaliser des prototypes ou maquettes du futur système. L'adéquation des prototypes avec les besoins des utilisateurs est validée par l'expert du domaine du métier, après avoir été implémentés par le programmeur.

Présentée sous cette forme, la méthode est clairement inadaptée au développement d'IHM innovants tels que les systèmes de réalité mixte.

D'une part, la conception de l'IHM intervient tardivement dans le processus de développement, et les utilisateurs ne sont impliqués qu'indirectement dans la définition des besoins et la validation du prototype élaboré. Par conséquent, la méthode 2TUP risque de compromettre la possibilité de proposer des prototypes utilisables pour les utilisateurs du futur système.

D'autre part, nous avons remarqué l'absence de mécanismes de collaboration pour les experts issus des domaines de compétence distincts. L'intégration de modèles pour la collaboration devient alors une nécessité pour garantir la mise en correspondance entre les aspects de GL et IHM, en particulier pour la conception d'interfaces de réalité mixte.

III.3 Méthode 2TUP étendue : principes et approches

Afin de pallier aux problèmes de conception de systèmes interactifs mixtes utilisant la méthode 2TUP, nous avons envisagé une extension de cette méthode (cf. Figure 3.2) afin d'intégrer les interactions de réalité mixte et assurer une collaboration efficace entre les experts des différents domaines.

Notre contribution est axée sur la branche de gauche de la méthode 2TUP où les activités GL et IHM sont toutes deux impliquées (cf. Figure 3.2).

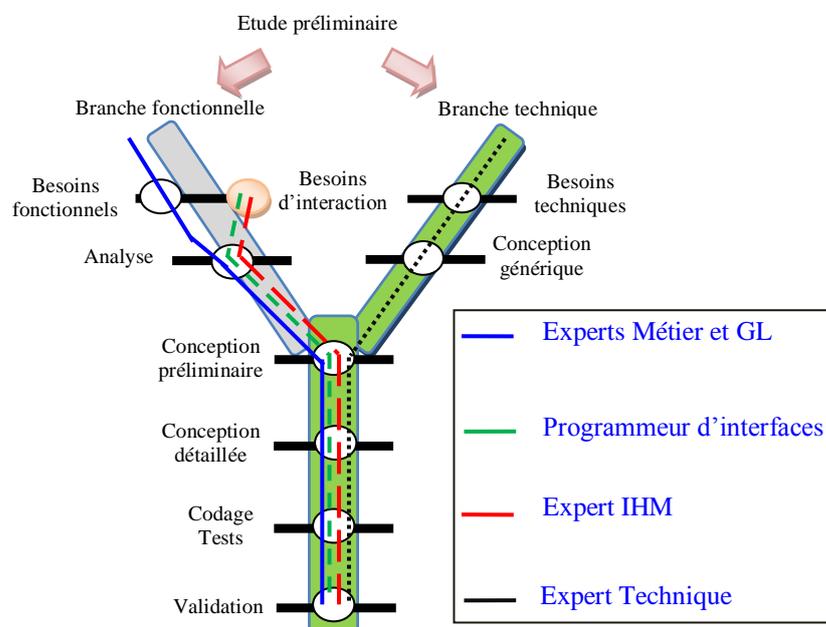


Figure 3.2 Méthode 2TUP étendue [31].

En pratique, l'extension de la méthode 2TUP est axée autour des points suivants [31]:

- Introduire le concept « spécification des besoins d'interaction »,
- Etablir la spécification des besoins d'interaction au même niveau que la spécification des fonctionnalités,
- Introduire le concept «objet d'interaction» pour modéliser l'espace d'interaction,
- Représenter la correspondance entre l'espace des fonctionnalités et l'espace d'interaction par la relation "décrire",
- Intégrer des modèles, approches et outils pour modéliser l'évolution de l'espace fonctionnel et de l'espace d'interaction,
- Impliquer les activités d'Interaction Homme-Machine et d'ergonomie dans la méthode,
- Formaliser le processus de collaboration entre les acteurs de la méthode.

En se basant sur l'analyse réalisée dans le chapitre II, nous avons pu identifier un ensemble de bonnes pratiques utilisées dans les méthodes de développement comme celles présentées dans [58], [64], [94] et [150]. Nous leur faisons appel afin d'identifier les besoins méthodologiques des systèmes de réalité mixte.

Dans ce cadre, nous avons proposé un ensemble de principes et approches pour construire une méthode intégrant les préoccupations, modèles et pratiques d'IHM et ceci à travers l'extension de la méthode 2TUP proposée. Bien que cette méthode, originaire du Génie Logiciel, soit focalisée sur la conception du noyau fonctionnel et des aspects métiers du système, des pratiques et des modèles d'IHM ont été intégrés pour la conception d'interfaces classiques et d'interfaces de réalité mixte.

En résumé, nous proposons d'établir nos contributions méthodologiques sur une évolution des caractéristiques générales de la méthode 2TUP [155] :

1. Les entités de la méthode 2TUP telles que les processus métier organisés sous forme de cas d'utilisation et les objets métier/composants métier sont maintenus.
2. Les caractéristiques de la méthode 2TUP sont eux aussi considérées, à savoir, itérative et incrémentale, basée sur la gestion des risques, réutilisabilité,...
3. Les besoins des utilisateurs seront considérés dans la conception d'IHM. Dans notre cas, nous ne sommes pas basés sur la conception centrée utilisateur car cette dernière met l'accent sur les données fournies par les utilisateurs pour décrire le prototype du futur système. La plupart des utilisateurs ne sont pas familiers avec les interfaces innovantes où ils devraient travailler dans un environnement fusionnant des entités réelles et virtuelles. La spécification du futur système est basée sur les intentions des utilisateurs pour décrire leurs tâches dans le système. Cette approche est particulièrement abordée par Constantine [70] qui utilise les "cas d'utilisation essentiels" pour décrire les intentions des utilisateurs. Par conséquent, nous introduisons dans notre méthode de conception l'approche développée dans [70] basée sur la conception centrée usage. Ici, les utilisateurs sont impliqués dans le processus de développement en fournissant une description textuelle, sous la forme de scénarii, des tâches qu'ils envisagent de réaliser. Ainsi, la conception d'IHM pour le cas de la réalité mixte est basée sur cette description.

Les points que nous avons abordés ci-dessus ont été traduits sous forme de principes pour construire une méthode qui intègre à la fois des pratiques de GL et d'IHM. Ces principes sont présentés comme suit:

III.3.1 Fusion des pratiques et activités de GL et IHM

Lors de l'intégration des pratiques de GL et d'IHM, les experts des deux domaines sont impliqués. Malgré les différences dans leurs cultures de développement, les processus, modèles et outils issues des activités de GL et d'IHM sont préservés.

Ainsi, nous avons défini un ensemble de rôles fonctionnels pour les acteurs impliqués dans la méthode et ceci en se basant sur les définitions de la communauté IHM :

- L'**expert métier** est responsable pour l'identification des besoins fonctionnels issus du domaine métier. Il s'occupe aussi du découpage conceptuel du métier ;
- L'**expert GL** possède des compétences en conception et en implémentation des systèmes informatiques et applications logicielles ;
- L'**expert IHM** est spécialisé(e) dans la conception d'Interface et d'Interaction Homme-Machine, en termes de processus, langage, modèles et outils. Il/elle possède une formation en psychologie sociale, conception visuelle, psychologie cognitive, mais manque de connaissance informatique sur le développement des IHM. Il/elle est, aussi, impliqué(e) dans le processus de développement dans l'évaluation de l'IHM et l'étude de utilisateur ;
- Le **programmeur d'interfaces** est spécialisé(e) dans la conception d'IHM du point de vue logiciel et possède des connaissances en ergonomie logicielle.

L'intervention des acteurs dans chacune des phases du cycle de développement est synthétisée dans le tableau 3.1 ci-dessous.

Tableau 3.1. Intervention des acteurs dans la méthode 2TUP étendue

Méthode 2TUP étendue					
	Spécification des besoins		Analyse	Conception	Validation
	Besoins fonctionnels	Besoins d'interaction			
Spécialiste Métier	×		×	×	
Expert GL	×		×	×	
Expert IHM		×	×	×	×
Programmeur d'interfaces		×	×	×	×
Utilisateur	×	×			×

Pour l'élaboration des aspects fonctionnels du système interactif, nous conservons l'approche fonctionnelle des spécifications du processus 2TUP originel, ainsi que les modèles UML utilisés.

Du point de vue de l'IHM, nous reprenons à la fois la méthode décrite par P. Renevier [150] qui s'appuie essentiellement sur la définition de scénarii (abstrait puis concrets) pour la spécification des interactions, et la méthode proposée par R. Chalon [58] pour la modélisation des interactions dans le cadre de systèmes de réalité mixte et collaboratifs.

Enfin, pour l'intégration des pratiques de GL et d'IHM, nous proposons de conserver les habitudes des différents experts, leur permettant d'exprimer leurs compétences spécifiques. Dans le même sens, nous proposons d'intégrer le processus de spécification d'interaction en parallèle à celui de la spécification du noyau fonctionnel.

Les utilisateurs finaux du système sont identifiés dès la phase d'étude préalable. Cependant, ils ne sont impliqués d'une façon directe qu'au cours de la spécification fonctionnelle des besoins. La spécification de l'interface homme-machine peut donc intervenir à partir de la phase de spécification fonctionnelle.

Nous considérons qu'à l'issue de la phase de spécification fonctionnelle des besoins, la vision du métier, inscrite dans le découpage des processus métier, est suffisamment claire pour permettre à l'expert IHM d'identifier les problèmes d'utilisabilité dans la réalisation des processus métier. À la suite de cette activité, le programmeur d'interfaces se joint au spécialiste IHM pour déterminer les types d'interaction (réalité mixte ou classique) adaptés à chaque élément du découpage des processus métier.

Par ailleurs, la phase d'analyse décrit la mise en œuvre logicielle des spécifications du système, en traitant l'organisation des objets métier sous forme de classes et la dynamique des relations entre ces classes. Dans la même optique, les éléments de l'IHM seront décrits sous forme de classes et de relations entre classes. L'avantage de cette approche et de pouvoir mettre en relation les entités de GL et d'IHM.

III.3.2 Activité de collaboration pour la conception

Afin de permettre aux acteurs de différents domaines de travailler ensemble, l'activité de collaboration doit être formalisée. Dans la plupart des cas, ces collaborations se déroulent de manière informelle et n'indiquent pas comment la synchronisation entre différents spécialistes devrait être réalisée.

La méthode 2TUP proposée devrait permettre aux acteurs du développement de GL et d'IHM de construire les spécifications de besoins fonctionnelles et d'interaction séparément et de collaborer par la suite. Un ensemble d'artefacts, des deux domaines sont produits afin de supporter l'activité de collaboration. Les activités de GL et d'IHM sont réalisées en parallèle et/ou en collaboration.

Dans notre étude, nous nous focalisons sur l'activité de collaboration afin de produire des artefacts et des modèles communs à plusieurs experts de cultures de développement différentes.

III.3.3 Un modèle pour formaliser les besoins d'interaction : les objets d'interaction

En se basant sur la même approche et la même formalisation des objets métier, nous proposons de représenter les concepts et les processus, élaborés au cours de la spécification des besoins d'interaction, sous la forme "d'Objets d'Interaction (OI)". La figure 3.3 représente un exemple d'objets d'interaction.

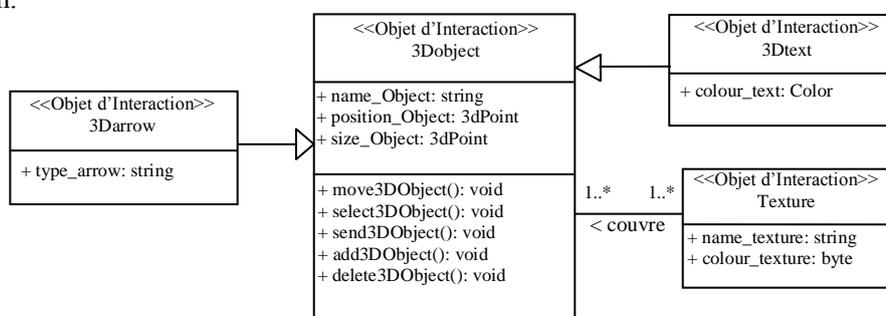


Figure 3.3 Extrait de la cartographie des objets d'interaction.

Afin de permettre une collaboration efficace entre les spécialistes de GL et d'IHM pour les activités d'analyse, de conception et d'implémentation, nous proposons une approche pour la modélisation des

relations conceptuelles entre les objets métier et les objets d'interaction. Concrètement, cela consiste à compléter le contenu des objets 2TUP en ajoutant la relation de dépendance "décrire" ("*describe*" en anglais). Cette relation décrit la correspondance entre les événements métier et ceux d'interaction. La figure 3.4 illustre une application de la relation « décrire » entre les objets métier et les objets d'interaction.

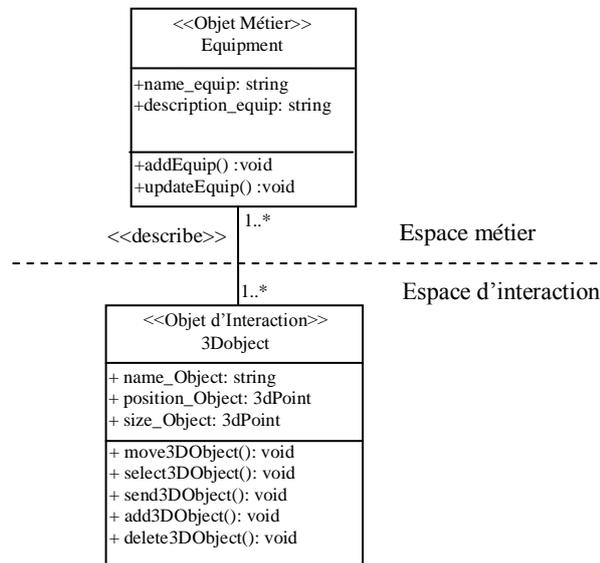


Figure 3.4 Exemple d'utilisation de la relation « décrire ».

Au cours de la phase d'analyse, les objets d'interaction sont formalisés en utilisant des modèles UML, de classes et de séquences, conceptuellement similaires à la modélisation des objets métier (cf. Figure 3.5).

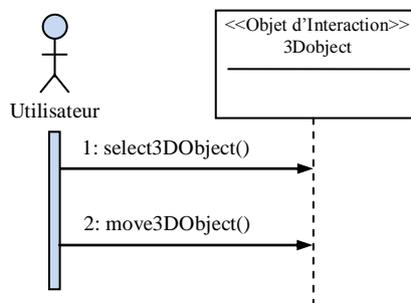


Figure 3.5 Extrait du modèle d'analyse des objets d'interaction.

Enfin, nous décrivons la relation entre les événements métier et les événements d'interaction, ainsi que la traduction des concepts de l'interaction dans le référentiel du métier. La connexion entre les objets métier et les objets d'interaction est décrite par les activités suivantes:

1. identifier les services des objets d'interaction qui peuvent avoir un impact sur l'espace métier ;
2. décrire les services d'applications métier qui peuvent être appelées lors du déclenchement des événements d'interaction ;
3. décrire la traduction des événements d'interaction dans les événements métier correspondants.

Pour formaliser et modéliser cette connexion, des scénarios et diagrammes de séquence UML peuvent être utilisés.

III.3.4 Artefacts (processus, modèles et outils)

Après avoir défini la démarche de mise en œuvre de mécanismes de collaboration entre rôles fonctionnels, nous définissons les modèles sur lesquels les experts des domaines métier et d'interaction peuvent se baser pour les mises en relation des fragments de modèles de GL et d'IHM.

Ainsi, les acteurs de la méthode utilisent un ensemble d'informations structurées en différents types d'artefacts tels que des modèles, des scénarii, des recommandations, etc. Ces artefacts supportent l'activité de collaboration pour les membres de l'équipe de développement, avec des cultures de conception et de développement différentes, impliqués dans le processus de développement. L'enjeu consiste à assurer la cohérence des artefacts des différents aspects du système. Aussi, ces artefacts doivent garantir une traçabilité des produits de la méthode, depuis l'identification des processus métier jusqu'à l'implémentation. Dans notre étude, trois types de modèles pour les activités de collaboration sont utilisés: scénarii au sens de Carroll [54], [156], diagrammes UML et objets 2TUP.

En fait, l'approche «scénarii» [54], [156], qui représente un outil essentiel pour décrire l'interaction de l'utilisateur, est utilisée pour la capture des besoins avec un haut niveau d'abstraction. Cette description facilite la convergence entre les activités de GL et d'IHM et aussi entre les utilisateurs et les concepteurs. De part leur formalisme simple et lisible, les scénarii sont également adaptés aux besoins de la communication avec les utilisateurs et les décideurs.

En raison des liens conceptuels qui peuvent exister entre l'espace métier et l'espace d'interaction, nous utilisons les objets 2TUP permettant d'identifier les composants logiciels du système, leur organisation et les services qu'ils proposent. Dans cette optique, la méthode proposée est axée sur la modélisation des espaces métier et d'interaction respectivement sous forme d'objets 2TUP métier et d'interaction, ceci, pour faciliter leur connexion.

En plus de ces modèles, un autre artefact peut servir comme outil de communication entre les équipes de développement et les utilisateurs, décideurs et aussi pour la validation de l'interface homme-machine. Il s'agit des prototypes qui représentent une approche largement utilisée pour l'évaluation de plusieurs aspects du système interactif.

La conception d'interaction dans le cadre de l'interface homme-machine est principalement basée sur des approches et des modèles présentés dans [59], [124] et [133]. Essentiellement, nous utilisons des diagrammes de tâches pour représenter les tâches des utilisateurs dans le système. Aussi, nous faisons appel à des modèles d'interaction spécifiques aux systèmes de réalité mixtes tels que ASUR [85], MIM [73], et IRVO [58].

Notons que la méthode n'est pas limitée à ces modèles puisque le contexte de la conception d'IHM permet l'implication d'autres modèles. Dans ce cas, les objectifs de l'activité dans laquelle les modèles sont intégrés ainsi que la cohérence inter-modèles doivent être respectés.

III.4 Développement de la méthode proposée sur un cas d'étude

Nous avons conclu auparavant (cf. Chapitre 1) que les nouvelles technologies constituent un outil d'aide et d'assistance performant pour les réparateurs, dans un contexte industriel. Nous avons évoqué, la nécessité d'intégrer ces nouvelles technologies dans le système de gestion de maintenance de l'entreprise (cf. Chapitre 2).

Traditionnellement, l'opérateur de maintenance se base sur des supports papiers et des descriptions textuelles pour utiliser et/ou décrire des informations comme les procédures de maintenance, les rapports d'intervention et la documentation. Dans ce contexte, l'opérateur est amené à travailler d'une façon manuelle qui s'avère longue et fastidieuse (cf. Section I.5.1 du chapitre 1).

En plus, lorsque le technicien est amené à coopérer ou collaborer à distance avec un réparateur spécialisé (ou un expert en maintenance) pour des situations de maintenance complexe, ils échangent des informations en utilisant le téléphone ou le chat. Cependant, les deux acteurs, en utilisant ces outils, n'arriveront pas à se comprendre d'une façon claire et simple (cf. Section I.5.2, chapitre 1).

Une aide efficace est donc nécessaire pour éviter les erreurs de réparation et réduire le temps d'intervention. La solution que nous avons envisagée est de permettre à l'opérateur de visualiser directement les informations indispensables d'une façon numérique sur support visuel directement recalées sur son environnement de travail (exemples: afficher la procédure de maintenance, afficher la pièce, indiquer lieu de l'intervention, afficher une fenêtre d'aide). De plus, nous envisageons de fournir à l'opérateur un moyen pour interagir avec l'interface réalisée dans le but de changer ou d'enrichir le contenu de ces informations (exemple: ajouter ou modifier une procédure de maintenance).

Dans ce cas, une interface interactive de réalité mixte est bien adaptée à la conception d'un système d'aide, notamment lorsque nous avons besoin d'évaluer les performances du réparateur, la complexité de la panne et l'évolution de l'opération de maintenance.

Dans notre cas, les différentes informations que le réparateur a besoin pour accomplir sa tâche peuvent être représentées sous forme d'objets numériques (objets virtuels 2D/3D). Il peut aussi manipuler ces objets ou d'autres objets de l'interface en utilisant des outils dédiés (exemples: stylet réel ou virtuel, module de reconnaissance de la main, écran tactile, etc.).

Dans les sections suivantes, nous détaillons le processus de développement que nous avons adopté pour ce cadre d'application en mettant l'accent sur la branche de gauche de la méthode 2TUP étendue [31]. Notre étude est basée sur deux cas pratiques : maintenance automobile et maintenance de systèmes de pompage photovoltaïque.

III.4.1 Etude préliminaire

Avant d'entamer la phase de développement, une étude préliminaire du métier est réalisée (cf. Figure 3.6). L'objectif est d'obtenir une décomposition fonctionnelle des besoins de l'utilisateur pour identifier les processus métier et leurs participants (les utilisateurs du système sont les suivants: réparateurs spécialisés, techniciens et techniciens qualifiés). Un processus métier désigne une séquence d'activités qui produit un service spécifique de l'application à un client particulier.

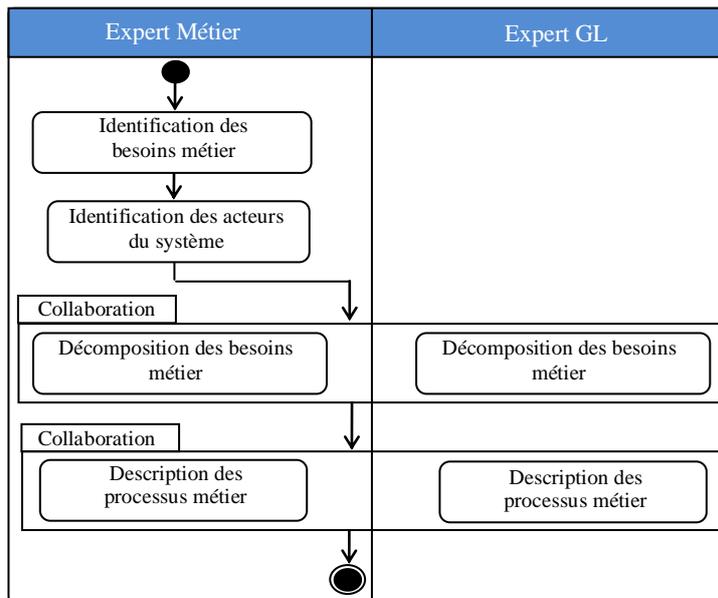


Figure 3.6 Diagramme d'activité de l'étude préliminaire.

Pour les études de cas (maintenance d'un moteur de voiture et maintenance d'un système de pompage photovoltaïque), nous nous focalisons sur la gestion des interventions. Dans ce cas, plusieurs processus métier sont identifiés: gestion des demandes d'intervention, gestion des demandes d'expertises, gestion des ordres de travail, gestion des tâches, gestion de documentation, gestion des équipements et composants, gestion des pièces de rechange, gestion des pannes/dysfonctionnements et gestion des procédures de maintenance. Dans ce qui suit, nous étudions le processus métier "gestion des procédures de maintenance". Ce dernier comprend l'exécution des procédures et l'enrichissement des procédures.

Notons qu'une procédure est constituée d'un ensemble de tâches de maintenance. Dans la suite de ce chapitre, le terme "tâche de maintenance" est aussi désigné par le terme "étape de maintenance" dans les différents modèles du processus de développement.

III.4.2 Spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction

Une fois les processus métier sont identifiés, la spécification des besoins fonctionnels est établie. L'objectif est à la fois de déterminer les fonctionnalités du système et le comportement des acteurs considérés dans le processus métier. Cette phase est étendue pour intégrer les spécifications des besoins d'interaction [29], [31]. Essentiellement, les experts des domaines de GL et d'IHM maintiennent leurs pratiques et modèles de conception pour construire le système final.

La figure 3.7 montre le diagramme d'activité UML des spécifications des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction. Une des originalités fondamentales de notre méthode apparaît dans cette phase, dans laquelle les experts métier et les spécialistes IHM travaillent séparément pour développer leur propre vision de l'application, en utilisant leurs propres pratiques.

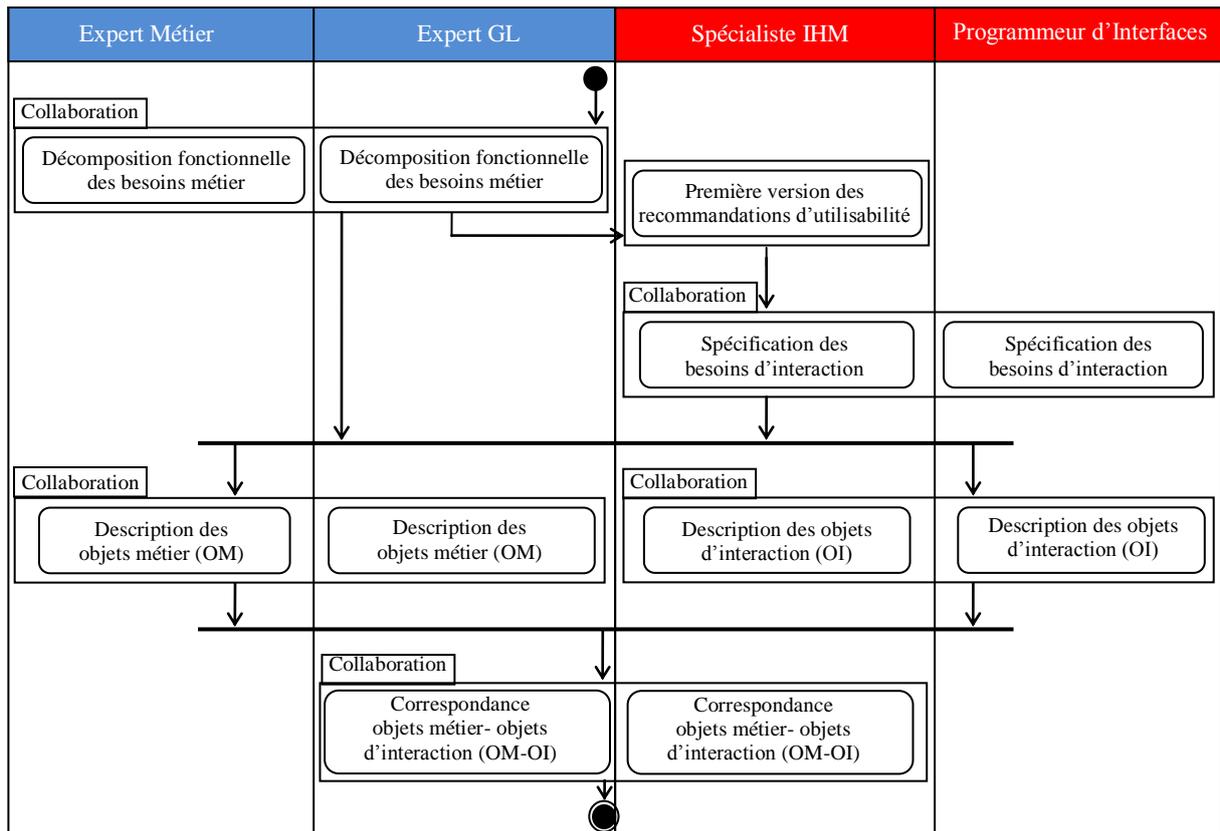


Figure 3.7 Phase de spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction.

III.4.2.1 Spécification des besoins fonctionnels

Cette activité, menée par les spécialistes métier et GL, permet l'organisation des fonctionnalités du système sous forme de cas d'utilisation. Ces cas d'utilisation sont regroupés dans un package UML, correspondant à des processus métier. Les spécialistes métier et GL décrivent, à partir des processus métier et des cas d'utilisation établis, les objets métier du système.

La figure 3.8 illustre le diagramme des cas d'utilisation du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance". Ce processus métier est raffiné en activités "exécuter une procédure" et "enrichir une procédure". Cette dernière est décomposée en sous-activités "ajouter une procédure" et "mettre à jour une procédure".

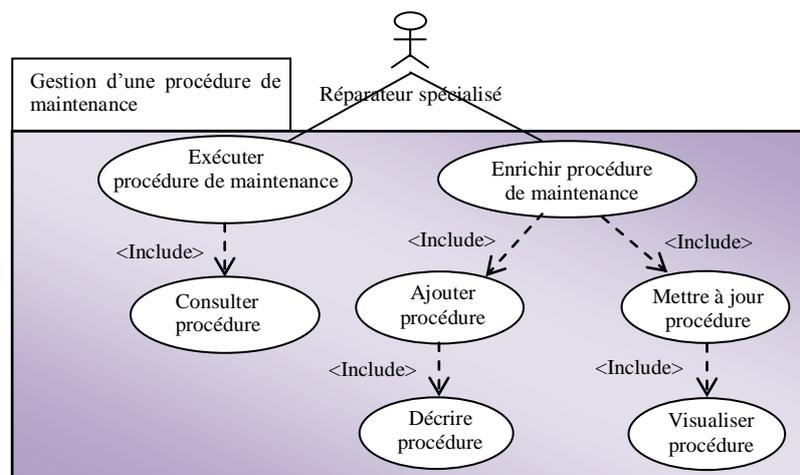


Figure 3.8 Diagramme des cas d'utilisation du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".

III.4.2.2 Spécification des besoins d'interaction

L'objectif est de décrire, à partir des besoins fonctionnels, le comportement des utilisateurs internes afin qu'ils réalisent concrètement les processus métier. Ceci est réalisable en introduisant les besoins d'interaction. La figure 3.9 détaille la phase de spécification des besoins d'interaction qui représente l'une des activités denses du processus de développement.

Une fois les processus métier sont identifiés, l'expert IHM établit une première version des recommandations d'utilisabilité et choisit un groupe d'utilisateurs pour les futures évaluations. L'expert IHM étudie l'activité réelle des utilisateurs: il/elle observe l'activité des différents réparateurs chargés de mettre à jour les procédures de maintenance. L'expert IHM génère donc un ensemble de recommandations d'utilisabilité. Dans les recommandations, deux types de critères sont favorisés: charge de travail minimale et guidance [16]. Dans notre cas, nous envisageons de développer une interface intuitive qui expose à l'utilisateur le nombre nécessaire de données et lui permet d'accéder aux différentes fonctionnalités du système en un nombre réduit d'actions.

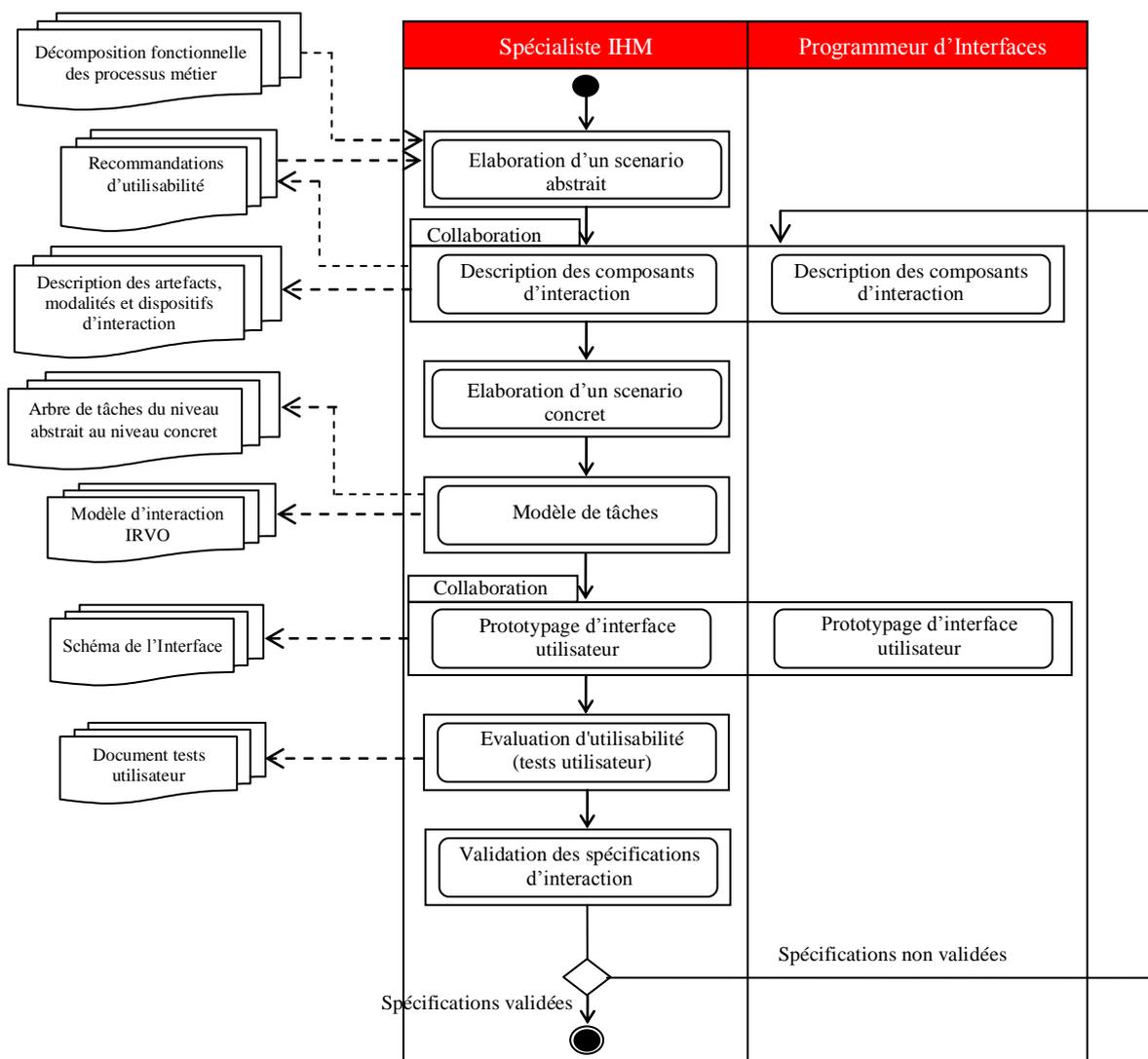


Figure 3.9 Phase de spécification des besoins d'interaction.

L'expert IHM collabore avec le programmeur d'interfaces afin de déterminer le type d'interface qui sera retenue pour l'application (exemple: interface de réalité mixte ou interface classique). Les décideurs sont impliqués pour estimer la valeur ajoutée et le coût induit par le choix d'interactions pour chaque processus métier.

Par exemple, les interactions de réalité mixte sont adaptées au processus métier "gestion des procédures de maintenance" pour plusieurs raisons:

- ➔ Les descriptions textuelles des tâches de maintenance sont souvent peu claires et difficiles à utiliser. L'évolution des opérations de maintenance est alors lourde et fastidieuse ;
- ➔ Diverses informations concernant une tâche de maintenance (outils de réparation, mesures des capteurs, types de panne, etc.) devraient être disponibles pour le réparateur à tout moment ;
- ➔ Les appareils portables standards tels que PC-tablette et PC-Pocket fournissent uniquement des supports textuels concernant les procédures de maintenance ;
- ➔ Le réparateur est incapable d'utiliser un ordinateur de bureau lors de l'activité de maintenance.

L'interface de réalité mixte permet aux réparateurs de visualiser et de manipuler les informations relatives aux tâches de maintenance, décrites sous forme d'objets 2D/3D, directement recalées sur leur environnement de travail. L'objectif est de promouvoir la facilité et l'intuition des interactions avec le système. En outre, la continuité des interactions entre les éléments numériques et le monde physique du système de réalité mixte permet de réduire la charge de travail des utilisateurs.

Par conséquent, le programmeur d'interfaces et l'expert IHM effectuent, pour chaque processus métier étudié, une affectation de types d'interaction. L'expert IHM complète, si nécessaire, cette affectation en se basant sur les recommandations d'utilisabilité.

Sur la base de ces recommandations, l'expert IHM élabore une projection des tâches de l'utilisateur, afin de décrire les interactions futures du système. A cet effet, l'expert IHM élabore, au début, pour chaque processus métier un "scénario projeté abstrait [156]". Ce scénario décrit les activités de l'utilisateur sans donner de détails sur les composants d'interaction et les types de dispositifs utilisés.

Un extrait du scénario projeté abstrait pour la tâche "ajouter une étape de la maintenance", du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance", est présenté comme suit (les informations liées au concept de "procédure de maintenance" est affiché en gras, italique et souligné): "*le réparateur spécialisé, face à l'équipement, observe une **nouvelle panne** qui ne figure pas dans la **liste des pannes**. Ce réparateur décrit une **nouvelle tâche** dans la **procédure de maintenance** correspondante à la **nouvelle panne**. Si nécessaire, il prend des photos et / ou des vidéos de la **panne** si elle est visible".*

Sur la base des recommandations d'utilisabilité, des cas d'utilisation et des scénarii projetés abstrait précédemment établis, la prochaine étape consiste à établir les composants d'interaction permettant de décrire et de concevoir l'interface homme-machine du futur système.

Description des composants d'interaction

L'expert IHM et le programmeur d'interfaces se focalisent sur les aspects suivants des futures interactions:

1. Les artefacts (objets) d'interaction: les représentations 2D/3D, telles que les textes, flèches, images, vidéos sont utilisées pour décrire les diagnostics de pannes, les tâches de maintenance, les équipements et leurs composants ainsi que les outils de réparation.
2. Les modalités d'interaction: (1) interaction vocale (procédures de maintenance enregistrées) pour guider le réparateur, étape par étape, au cours de la réparation, (2) interaction tangible en entrée (exemple: stylet 3D) pour manipuler des objets 2D/3D, (3) interaction tactile pour manipuler des interfaces sur des supports mobiles.
3. Les dispositifs supportant les interactions: casque de visualisation vidéo HMD, tablette, smartphone, camera, microphone, etc.

Elaboration de scénarii projetés concrets

Les composants d'interaction définis ci-dessus sont intégrés dans les processus métier, en particulier, dans les scénarii projetés abstraits. Nous obtenons ainsi des "scénarii projetés concrets [156]". Un extrait du scénario projeté concret pour la tâche "ajouter une étape de maintenance" est présenté comme suit (les composants liés au concept "augmentation" sont indiqués en gras, italique et souligné): "*Le réparateur spécialisé est en face de l'équipement à maintenir. Le flux vidéo de la scène est enclenché par l'intermédiaire de la caméra. La procédure de maintenance augmentée est ensuite affichée sur le dispositif de réalité mixte. Le réparateur spécialisé se déplace autour de l'équipement et observe une nouvelle panne qui surgit. Pour indiquer la solution à cette panne, le réparateur spécialisé crée une nouvelle tâche augmentée en utilisant des objets 2D/3D (textes, flèches, outils de réparation, etc.). Cette tâche est ensuite positionnée, orientée et mise à l'échelle, en utilisant l'écran tactile mobile ou le casque HMD avec le stylet virtuel. En outre, le réparateur insère un enregistrement vocal à l'aide du microphone".*

Enfin, un modèle de tâches utilisateur de bas niveau est établi à partir des scénarii projetés concrets. La figure 3.10 représente un exemple d'un arbre de tâches concret pour le sous-processus "mettre à jour une procédure de maintenance du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance", en utilisant le formalisme « ConcurTaskTrees » (CTT) [141], [117], [126].

L'arbre des tâches CTT décrit la décomposition fonctionnelle des activités de l'utilisateur et du système. La dimension verticale de l'arbre correspond à une hiérarchie des tâches du niveau abstrait au niveau concret. La tâche la plus basse représente un raffinement de la tâche parent. La dimension horizontale représente l'enchaînement des tâches [141]. Un ensemble de relations est défini pour formaliser le lien entre des tâches qui se trouvent au même niveau (cf. Figure 3.10).

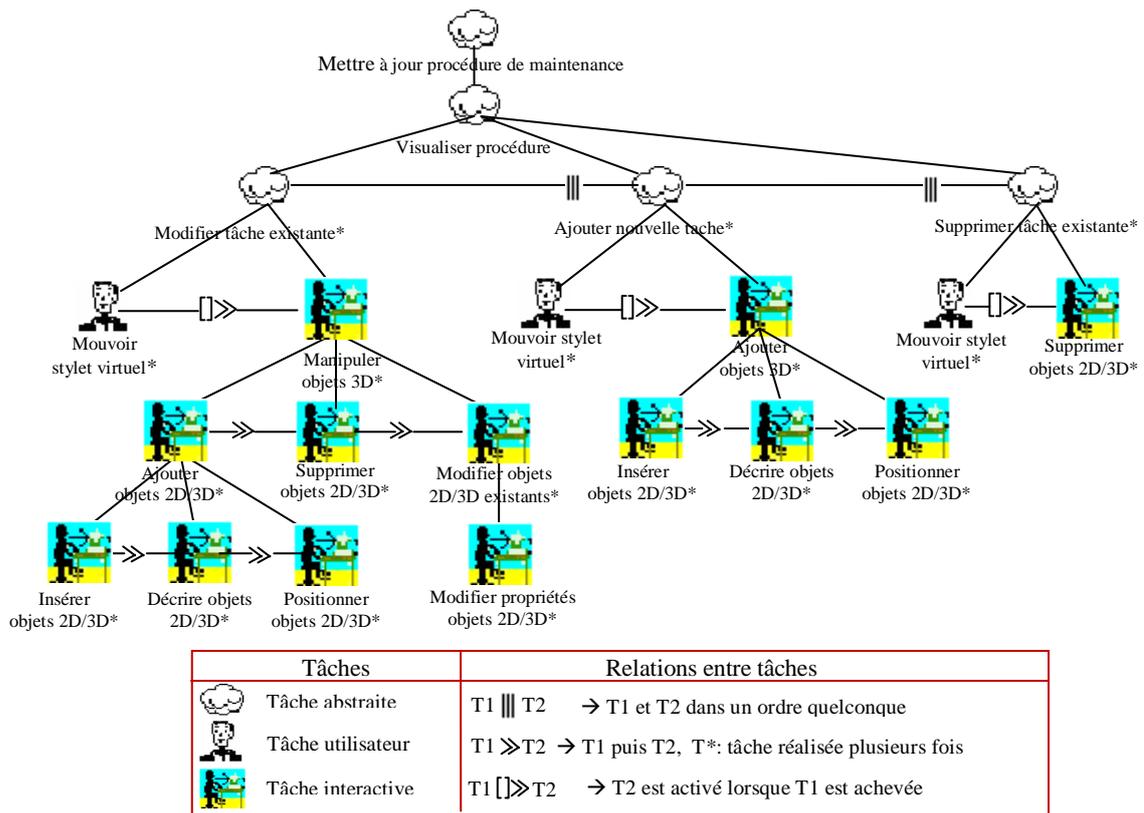


Figure 3.10 Diagramme de tâches CTT pour le sous-processus "mettre à jour une procédure de maintenance".

Pour mettre à jour une procédure de maintenance, trois situations se présentent: ajouter une nouvelle étape (représentant une nouvelle tâche) dans la procédure, modifier et supprimer une étape existante dans la procédure. Par exemple, pour ajouter une nouvelle tâche, le réparateur spécialisé insère des objets 2D/3D à l'aide d'un stylet virtuel, puis décrit le contenu et la position de chacun de ces objets.

Modélisation de l'interaction

Un diagramme d'interaction décrivant l'interaction de l'utilisateur avec les objets physiques et numériques de l'interface du futur système est nécessaire. Notre étude porte sur le formalisme IRVO [58], [59]. Ce diagramme permet essentiellement au concepteur de décrire les relations conceptuelles entre les entités physiques et numériques, les modalités utilisées par l'utilisateur, les relations physiques entre les dispositifs supportant les modalités et les mécanismes de coopération/collaboration entre plusieurs utilisateurs.

Dans la figure 3.11, le réparateur spécialisé (utilisateur) porte un casque de visualisation de réalité mixte "HMD" ($Effector=E$). Ce dispositif affiche la procédure de maintenance sous forme d'objets d'interaction alignés sur la scène vidéo de l'équipement ($Object=Or$). Une caméra ($Sensor=S$) est utilisée comme un dispositif d'entrée pour la capture vidéo et la reconnaissance de la scène. Un marqueur ($Tool=Tr$) est fixé sur le doigt du réparateur spécialisé. La caméra détecte le marqueur et un stylet virtuel 3D ($Tool=Tv$) est ensuite affiché. La localisation du marqueur et la détermination de la position du stylet virtuel 3D sont calculées à partir de la librairie i-ARToolKit (Improved Augmented Reality Toolkit) [20], [27]. Le réparateur spécialisé utilise le stylet virtuel 3D ($Tool=Tv$) pour interagir avec la procédure de maintenance augmentée ($Object=Ov$) et également avec un menu 3D ($Object=Ov$).

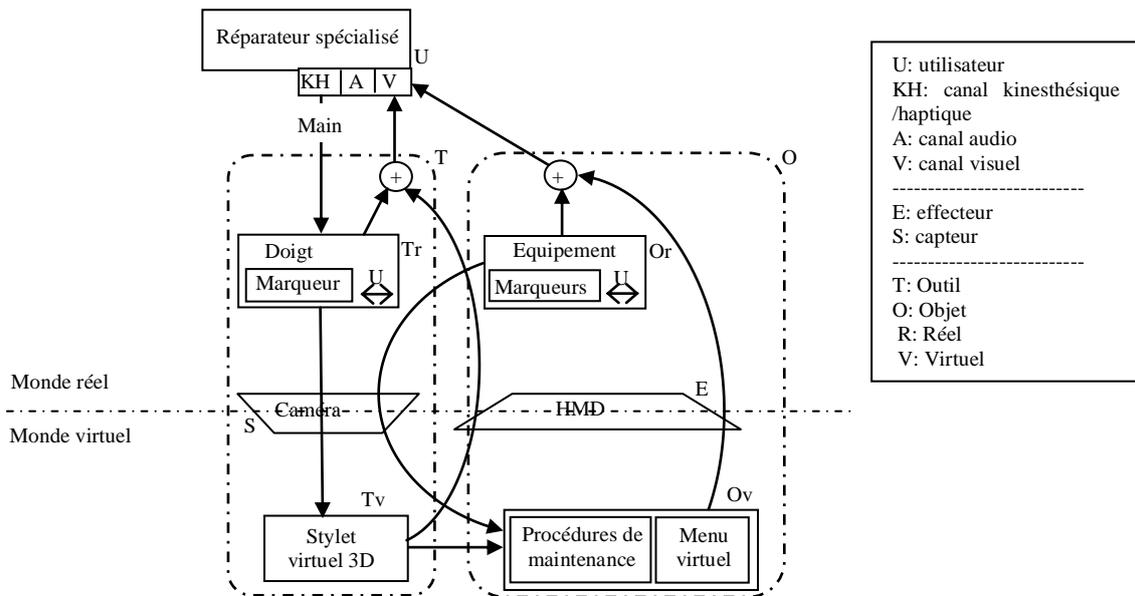


Figure 3.11 Diagramme IRVO de l'application.

Extension des cas d'utilisation

Une fois les aspects d'interaction du futur système sont établis, les experts GL et IHM collaborent pour obtenir des cas d'utilisation plus raffinés. La figure 3.12 décrit l'évolution des cas d'utilisation du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance". Cette description montre que l'intégration des composants d'interaction au concept de "procédure" nécessite des cas d'utilisation supplémentaires.

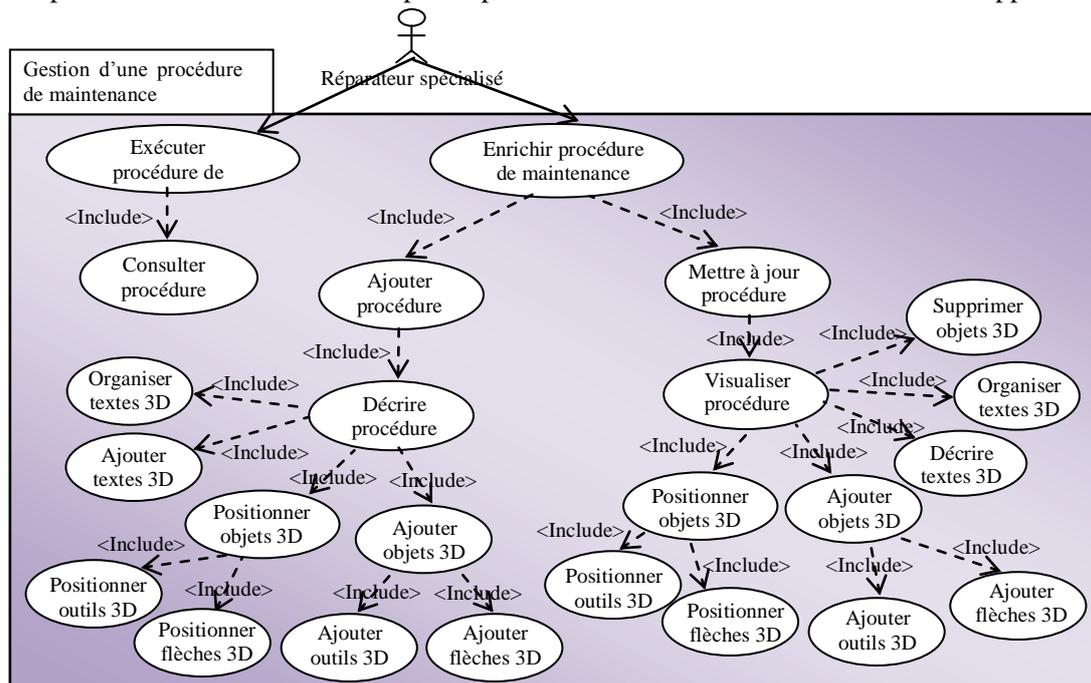


Figure 3.12 Evolution du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".

Prototypage de l'interface utilisateur

Cette étape est nécessaire pour consolider la conception de l'interface homme-machine. Dans ce cas, nous proposons que l'expert IHM et le programmeur d'interfaces collaborent afin d'établir un prototype itératif d'interface utilisateur en se basant sur la description des composants d'interaction et les recommandations d'utilisabilité déjà établies. Le prototype proposé permet, par la suite, à l'expert IHM d'appliquer des critères d'évaluation pour valider les spécifications d'interaction. La figure 3.13 montre

un premier prototype d'Interface Utilisateur affiché sur un casque de visualisation. Les composants d'interaction comme textes 3D, flèches 3D, outil 3D, discours vocal sont utilisés pour décrire le contenu d'une procédure de maintenance.

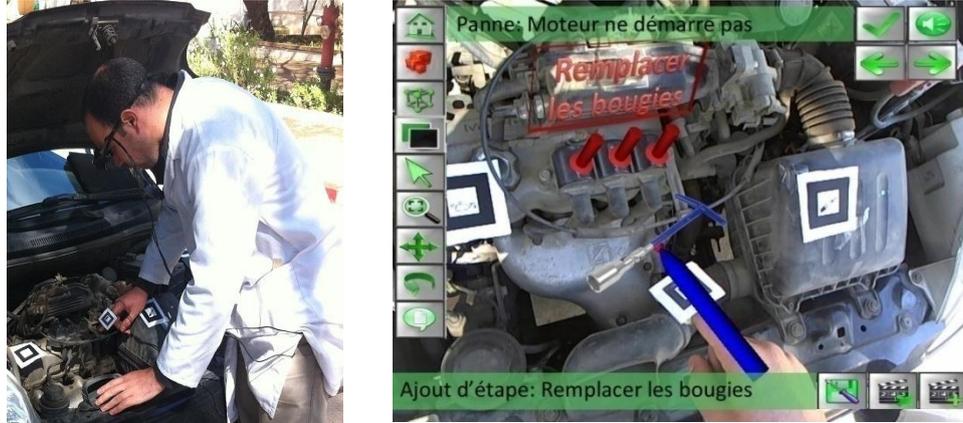


Figure 3.13 Exemple de prototype d'interface sur le casque de visualisation HMD du réparateur.

Évaluation de l'interface

Sur la base des prototypes, les composants d'interaction et les scénarii concrets, l'expert IHM élabore des tests de validation pour tous les produits de la spécification des besoins d'interaction. Selon les résultats des tests d'utilisabilité, une nouvelle itération de la spécification des interactions peut être réalisée, en retournant si nécessaire au scénario abstrait. Ce cas peut se produire lorsque le prototype conduit à des situations d'interaction difficiles à gérer par l'utilisateur.

Une fois les besoins d'interaction sont validés, l'expert IHM établit la composition finale des objets d'interaction correspondants. Il s'agit d'organiser les différents concepts d'interaction sous forme d'une liste contenant les composants d'interaction mis en jeu dans l'élaboration du futur système interactif. Dans notre cas, nous introduisons onze composants d'interaction. A partir de cette donnée, le spécialiste IHM identifie, d'un point de vue orienté objets, les objets d'interaction correspondants pour la réalisation d'un processus métier.

III.5 Evolution de l'espace métier

L'activité de collaboration entre les experts des domaines GL et IHM, effectuée pendant la phase de spécification des besoins, conduit à l'évolution de l'espace métier. La figure 3.14 résume l'évolution de l'espace métier où trois aspects sont concernés: processus métier, activités métier et objets métier.

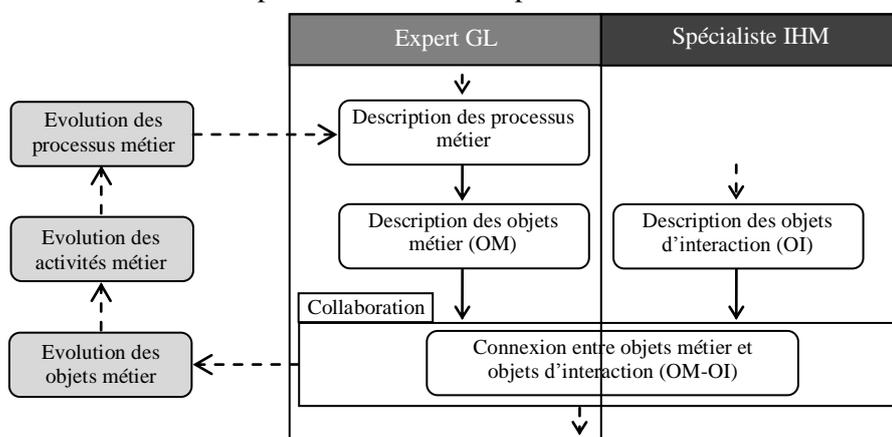


Figure 3.14 Evolution de l'espace métier.

III.5.1 Evolution des objets métier

L'évolution des objets métier consiste à vérifier si le modèle d'objets d'interaction prend en charge les préoccupations relatives aux objets métier. Par exemple, le système de réalité mixte intègre des données visuelles pour montrer la manière avec laquelle les procédures maintenance doivent être exécutées dans la scène réelle. En effet, l'objet métier "procédure de maintenance" possède une description dense lors de l'établissement d'un modèle d'objets d'interaction. Ce dernier est représenté par les entités: "3D text", "3D Arrow", "Recorded speech" et "3D Tool".

En outre, des transformations peuvent se produire au niveau des objets métier après le déclenchement des objets d'interaction. Par exemple, l'objet d'interaction "3D Component" qui décrit, selon la relation «décrire», un composant de l'équipement dans un environnement 3D, conduit à une extension de l'objet métier "Equipment", du processus métier "gestion des équipements". Ainsi, il est possible d'intégrer les composants d'équipements dans l'espace métier, et par conséquent dans le système d'information, en utilisant un nouvel objet métier "Component" (cf. Figure 3.15).

A noter que la relation «décrire» permet de formaliser la communication entre les objets métier et les objets d'interaction.

III.5.2 Evolution des activités métier

L'intégration des objets d'interaction et l'établissement des relations avec les objets métier impliquent de nouveaux concepts dans l'évolution de l'espace métier. Par conséquent, de nouvelles activités pour l'organisation et l'utilisation des données des deux domaines sont réalisées au niveau des activités métier. Dans ce contexte, de nouveaux cas d'utilisation pour ces activités apparaissent. Les figures 3.8 et 3.12 montrent l'organisation des cas d'utilisation respectivement avant et après l'évolution de l'espace métier. Les objets d'interaction comme "3D text", "3D Arrow", "Recorded speech" et "3D Tool" sont intégrés dans le concept de "procédure de maintenance" décrit dans l'espace métier. Des cas d'utilisation supplémentaires sont ainsi élaborés permettant de relier ces objets d'interaction au concept de "procédure de maintenance" (cf. Figure 3.12).

III.5.3 Evolution des processus métier

L'évolution des processus métier consiste à capitaliser les nouveaux cas d'utilisation introduits au niveau des activités métiers. Cela se fait par l'intégration de nouvelles données dans les sous-processus métier et l'implication de nouveaux acteurs dans le système d'information.

Par exemple, l'activité de "gestion des procédures de maintenance" peut être attribuée à un réparateur spécialisé. Ce dernier peut insérer directement des représentations 3D montrant l'enchaînement des procédures de maintenance. Ces représentations sont ensuite intégrées dans le système d'information sous la forme d'objets d'interaction.

III.6 Phase d'analyse

Cette phase permet le passage de la structure fonctionnelle à travers les cas d'utilisation à la structure objet via des classes et des catégories. Deux types d'études peuvent être réalisés pendant cette phase : l'analyse statique et l'analyse dynamique. L'enjeu essentiel de cette phase est d'exprimer l'organisation des objets métier et des objets d'interaction et la relation entre eux. L'organisation des espaces métier et d'interaction sous forme d'attributs et de méthodes est décrite sous forme de modèles statiques (analyse statique). La relation entre les deux espaces est détaillée sous forme de modèles dynamiques (analyse dynamique).

III.6.1 Analyse statique

Durant cette phase, l'objectif consiste à décrire les objets métier qui représentent un fragment d'un processus métier. En utilisant le diagramme de classes UML, ces objets sont représentés par un ensemble de classes, contenant des attributs et des opérations. Ces classes sont reliées entre-elles par des associations. Du point de vue de l'IHM, le même principe est adopté pour modéliser les objets d'interaction.

La figure 3.15 montre le modèle statique du processus métier "gestion des procédures de maintenance". En plus des classes, ce modèle représente la relation "décrire" qui relie les objets d'interaction (exemple: classe "3D Object") aux objets métier (exemple: classe "Procédure"). Cela signifie que les objets 3D issus de l'espace d'interaction décrivent le concept "procédure" de l'espace métier.

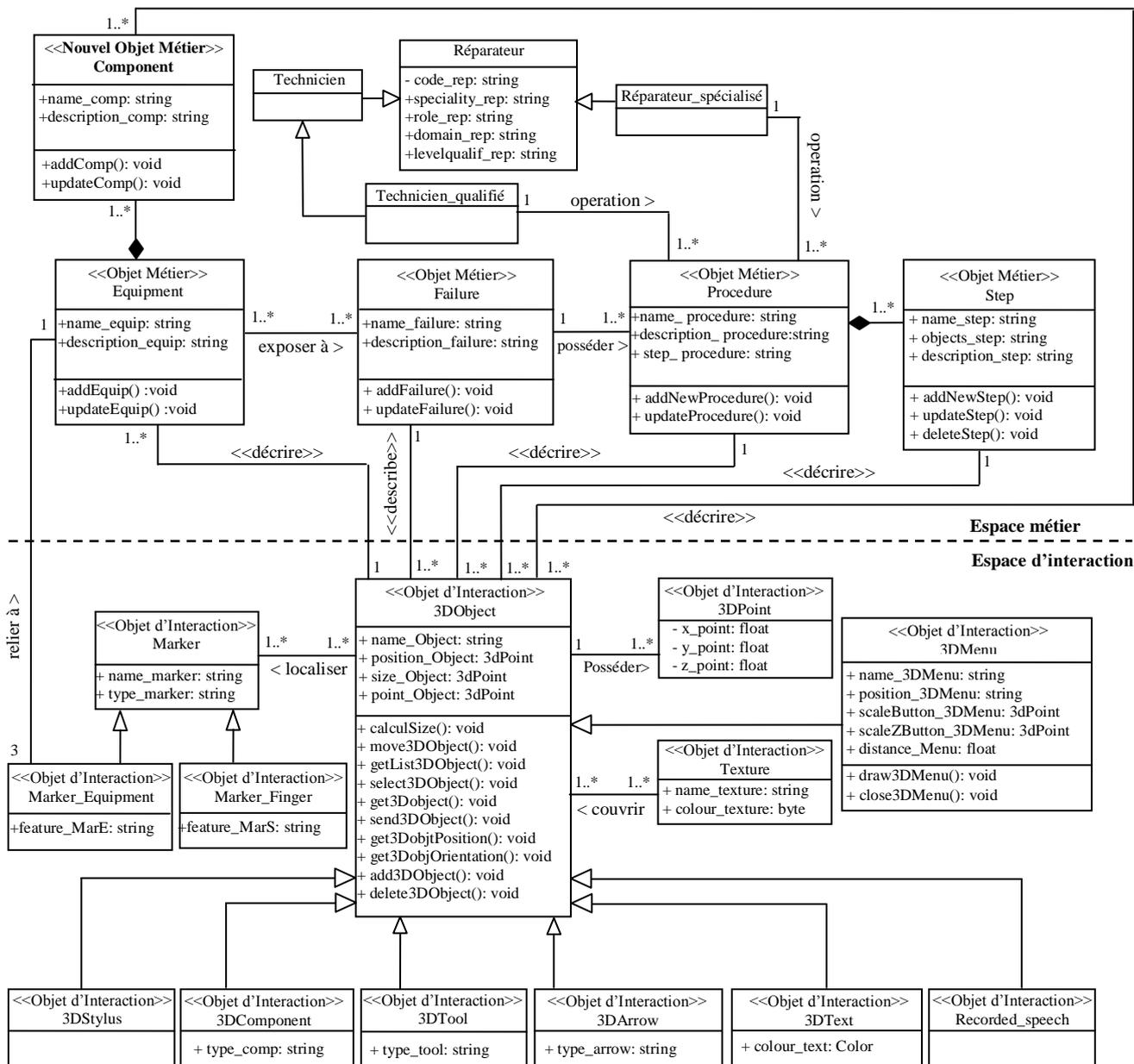


Figure 3.15 Modèle statique qui décrit l'espace métier et l'espace d'interaction.

III.6.2 Analyse dynamique

Pour l'espace métier, l'analyse dynamique consiste à transformer les cas d'utilisation établis au cours des spécifications en diagrammes de séquences UML. Ces diagrammes représentent les liens possibles entre les instances des classes ainsi que les messages qui peuvent être échangés entre ces instances. La figure 3.16 illustre le diagramme de séquences "ajouter une nouvelle étape" du sous-processus métier "mettre à jour une procédure de maintenance". La méthode "addNewStep(stepID, name, description)" appliquée à l'instance "Step" permet d'ajouter une nouvelle étape dans une procédure de maintenance.

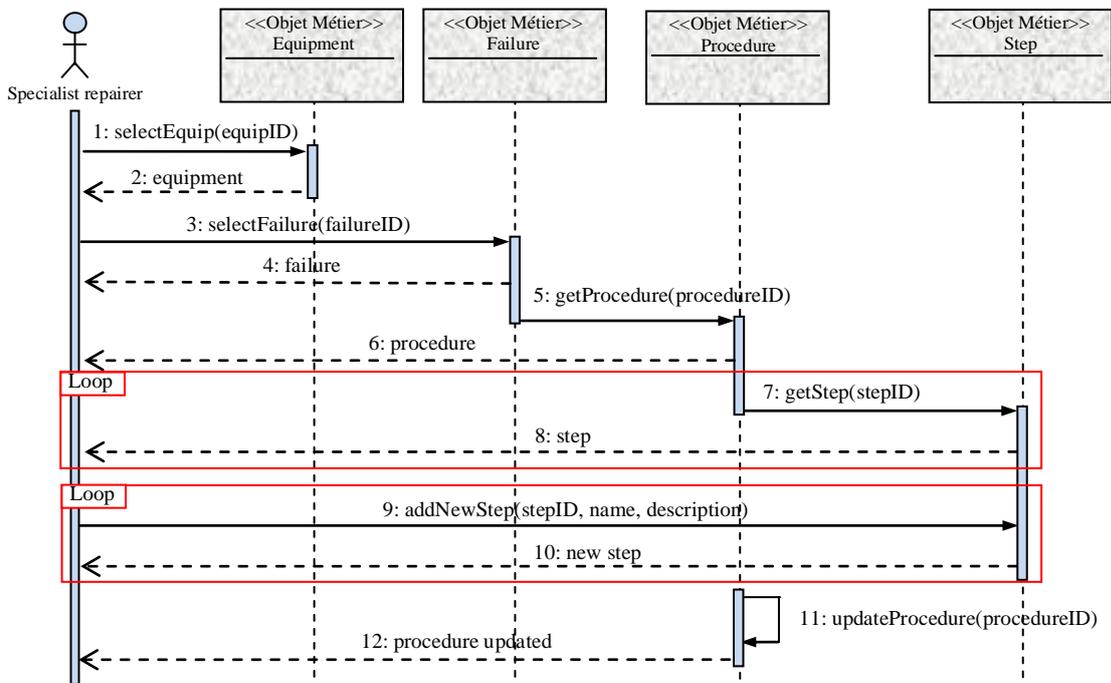


Figure 3.16 Extrait du modèle dynamique de l'espace métier.

L'analyse dynamique dans l'espace d'interaction consiste à formaliser les objets d'interaction où la description est basée sur les diagrammes de séquences UML. Par conséquent, les arbres de tâches établies lors de la spécification des besoins d'interaction sont raffinés en diagrammes de séquences UML. La figure 3.17 montre un diagramme de séquences "ajouter des objets d'interaction". Dans ce diagramme, les objets tels que texte 3D, flèche 3D et outil 3D sont insérés à travers la classe "3D Object" dans une nouvelle étape déjà définie dans l'espace métier. Ainsi, ce diagramme représente l'opération d'ajout d'une nouvelle étape dans l'espace d'interaction.

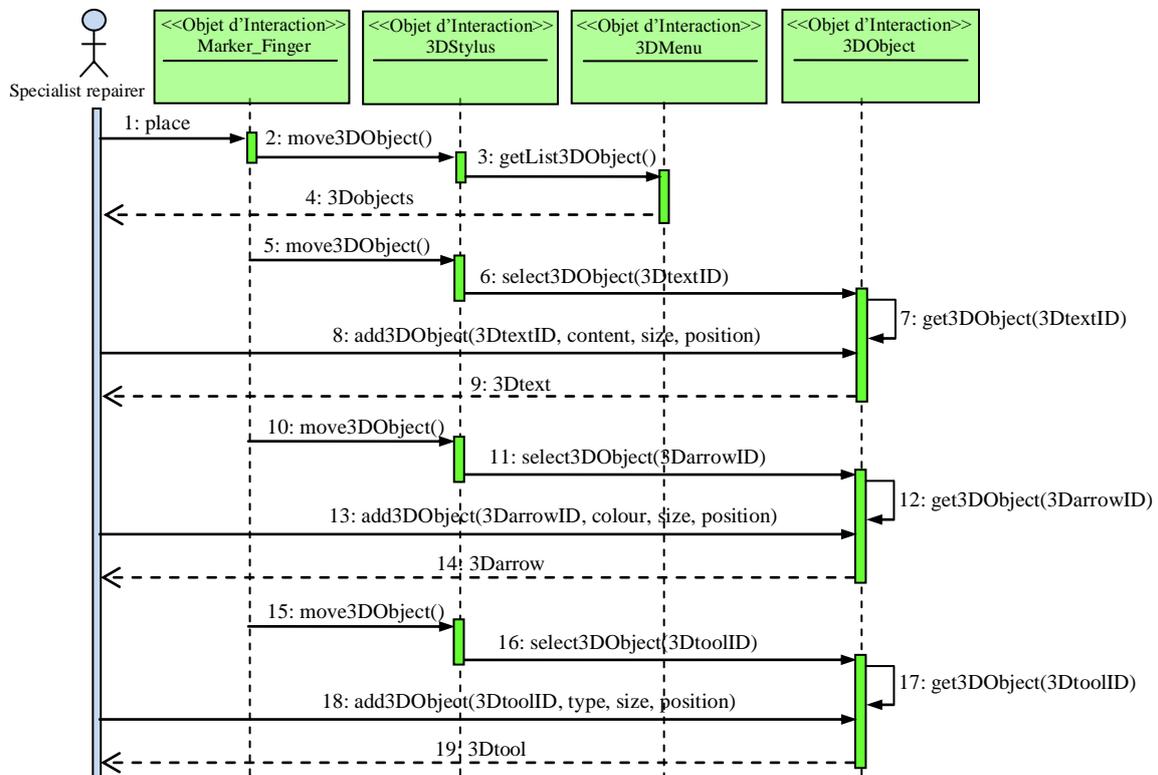


Figure 3.17 Extrait du modèle dynamique de l'espace d'interaction.

Une fois les objets métier et les objets d'interaction sont formalisés, les services de l'espace d'interaction qui peuvent avoir un impact sur l'espace métier sont établis via la relation «décrire». Cette dernière est elle aussi formalisée par le diagramme de séquences UML. Ainsi, la communication entre les objets métier et les objets d'interaction, par l'intermédiaire de la relation "décrire" est réalisée en trois activités:

1. Identifier les objets d'interaction (exemple: "3DObject") qui ont un impact sur l'espace métier,
2. Identifier les objets métier (exemple: "Procédure", "Step") qui doivent être appelés lorsque les événements d'interaction sont déclenchés,
3. Décrire la correspondance entre les événements d'interaction et les événements métier ("add3DObject ()", "send3DObject ()" et "addNewStep ()").

La figure 3.18 représente un diagramme de séquences complémentaire pour mettre à jour le concept "procédure". Les événements d'interaction (add3DObject(3DtextID, content, size, position), add3DObject (3DarrowID, colour, size, position) et add3DObject (3DtoolID, type, size, position))" sont traduits en événements métier "addNewStep(stepID, name, description)" et "updateProcedure (ProcedureId). La figure 3.18 montre que l'ajout d'objets 3D dans l'espace d'interaction implique la mise à jour de l'objet "procédure" dans l'espace métier.

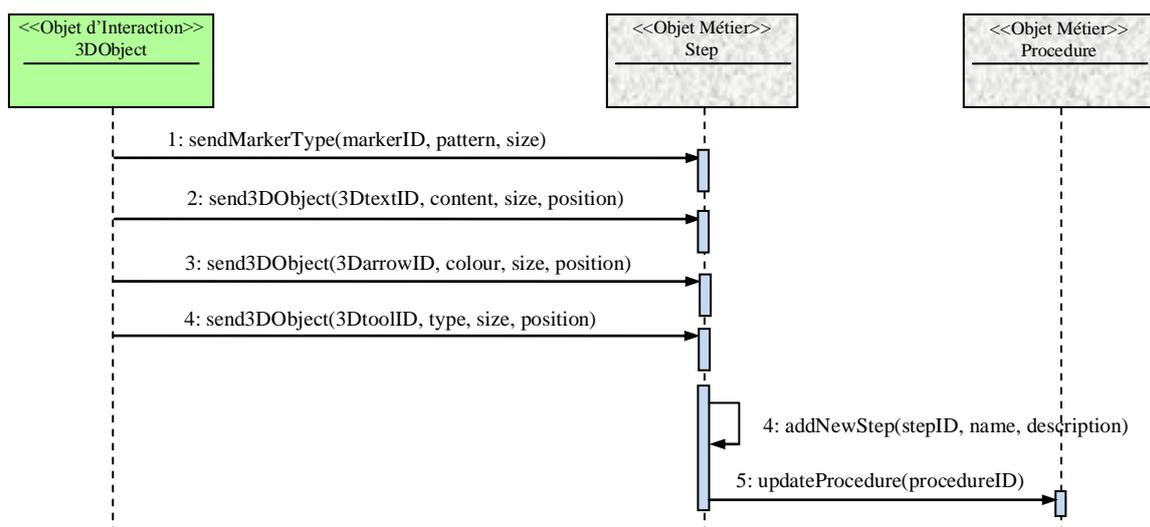


Figure 3.18 Correspondance entre les objets d'interaction et les objets métier.

III.7 Évaluation de la méthode 2TUP étendue et discussion

Malgré l'apport de la méthode proposée, elle doit être évaluée. Cette évaluation porte sur les différents aspects de la méthode: processus, langages, modèles et outils. Dans notre cas, des expérimentations ont été menées afin de valider la méthode 2TUP étendue. Le paramètre essentiel de cette validation est l'acceptation de la méthode par les utilisateurs.

Plusieurs recherches ont été entreprises concernant l'évaluation des méthodes de développement [1], [10], [78] et [125]. Selon Moody [125]: "en dépit des avantages potentiels des méthodes de conception des Systèmes d'Information (SI) déjà publiées [184], [187], il a été constaté le manque de recherche empirique approfondie sur l'efficacité des méthodes en pratique".

L'une des approches utilisées pour évaluer les méthodes de conception des SI, est celle développée par Davis [79]. Ce dernier propose un modèle d'évaluation appelé Modèle d'Acceptation Technologique (MAT). Pour améliorer l'évaluation des méthodologies, Moody [125] propose, par la suite, d'intégrer le pragmatisme méthodologique (PM) dans le modèle d'acceptation technologique (MAT). Les méthodes de développement sont, ainsi, évaluées selon deux aspects [125]:

1. Le Pragmatisme Méthodologique (PM) qui s'appuie sur l'évaluation de l'effectivité, mesurant la qualité du produit résultant de l'application de la méthode, et l'évaluation de l'efficacité, mesurant la complexité de la tâche nécessaire à la réalisation du produit ;

2. Le Modèle d'Acceptation Technologique (MAT) supporte trois constructions principales [79]:

- Facilité d'utilisation perçue qui représente le degré auquel une personne croit que l'utilisation d'une méthode particulière serait libre d'effort;
- Utilité perçue désigne la probabilité subjective d'une personne que l'utilisation d'un système particulier augmenterait son rendement au travail;
- Intention d'utiliser indique la mesure avec laquelle une personne a l'intention d'utiliser un système particulier.

La combinaison de ces deux modèles par Moody [125] conduit à un Modèle d'Evaluation de la Méthode (MEM) utilisé pour évaluer les méthodes de conception des SI (cf. Figure 3.19). Ce modèle utilise à la fois les dimensions objectives (réelles) et subjectives (perçues) et les liens entre-elles.

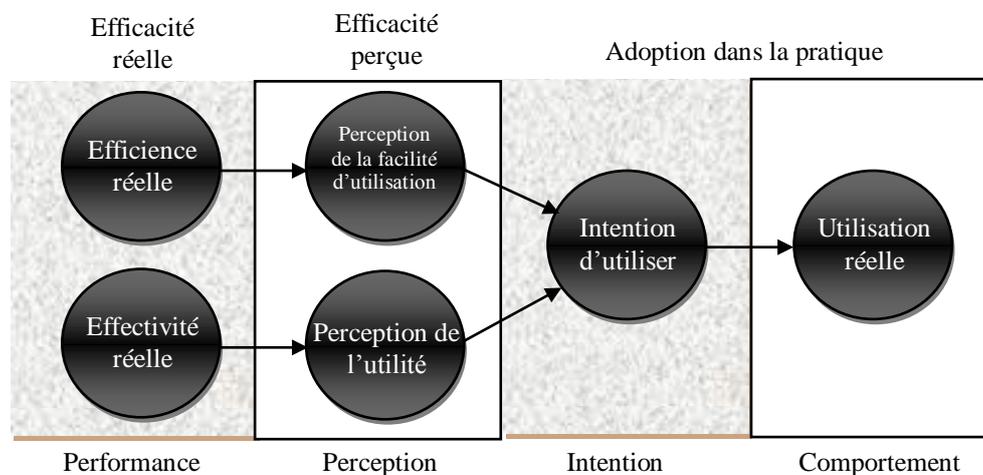


Figure 3.19 Modèle d'évaluation de Moody [125].

Ce cadre de validation nous a permis d'identifier les axes d'évaluation de notre méthode. Ainsi, nous nous sommes basés sur l'évaluation de:

1. **L'effectivité réelle** de la méthode, considérant les différentes implémentations de la méthode. L'évaluation se focalise sur les modèles des phases d'analyse et de conception;
2. **La perception de la facilité d'utilisation** de la méthode, impliquant des concepteurs, des spécialistes et des utilisateurs dans un fragment de cycle de développement (phases de spécifications et d'analyse). L'évaluation concerne les processus, les modèles et les outils.

III.7.1 Évaluation de l'effectivité réelle de la méthode

Il s'agit d'examiner si les développeurs peuvent générer des applications composées de composants réutilisables. Nous vérifions aussi la possibilité de séparer les deux aspects : métier et interaction. Dans ce contexte, nous considérons, pour évaluer l'effectivité réelle de la méthode, les trois propriétés suivantes: (1) réutilisation des objets 2TUP, (2) découplage des espaces métier et interaction et (3) complexité des composants.

Afin de valider ces propriétés, nous avons réalisé trois implémentations d'un fragment de la même application (exemple: aide à la maintenance d'un moteur de voiture par la réalité mixte) en se basant sur le langage C#. Nous utilisons, pour cela, les mêmes modèles de spécification et d'analyse. Les trois implémentations ont été évaluées en fonction des propriétés logicielles standards de génie logiciel [6], [77], [94].

Les trois implémentations ont le même nombre d'objets 2TUP: quatre objets d'interaction et deux objets métier. Aussi, un formalisme de mise en correspondance est nécessaire pour connecter l'espace métier à l'espace d'interaction.

La première implémentation utilise le modèle de communication traditionnel MVC [116] où les objets métier et les objets d'interaction, respectivement, jouent le rôle des objets "Modèle" et "Vue" au sens MVC. La traduction des événements de l'espace d'interaction, à partir des appels de méthodes, dans l'espace métier est assurée par l'objet "Contrôleur".

La seconde implémentation utilise la méthode précédente avec la variante suivante: le modèle MVC est implémenté en utilisant un modèle de communication proposé par Eckstein [87] permettant une indépendance totale entre les objets "Modèle" et "Vue" et par conséquent entre les objets métier et d'interaction. Dans cette implémentation, une attention particulière a été accordée à la structure du code (factorisation du code, subdivision de méthodes, etc.) afin d'assurer une complexité minimale pour l'application.

La troisième implémentation est basée sur un modèle architectural AMF-C [58], [173] proposé pour la conception de systèmes de réalité mixte. En se basant sur cette approche, la traduction des événements est effectuée par l'objet "Contrôleur" au sens AMF-C. Les objets métier et les objets d'interaction jouent, respectivement, le rôle des objets "Abstraction" et "Présentation".

Trois programmeurs ayant des expériences différentes dans la programmation orientée objet (un programmeur est expérimenté et deux sont intermédiaires) ont pris part dans la construction de ces implémentations. La qualité du code produit est évaluée en fonction des propriétés logicielles standards [6], [77], [94].

La qualité des trois codes d'implémentation est évaluée avec les trois programmeurs utilisant quatre propriétés logicielles (cf. Tableau 3.2). Chacune de ces propriétés est notée sur une échelle de 1 à 5 (5: tout à fait d'accord, 4: d'accord, 3: moyen, 2: un peu en désaccord, 1: complètement en désaccord). Le score associé à chaque propriété (cf. Tableau 3.2) est une moyenne des trois opinions des programmeurs. Notons que les opinions des trois programmeurs, pour chacune des ces propriétés, sont données, plus en détail, dans la section 3 de l'annexe B.

Tableau 3.2. Résultats des tests des trois implémentations

N°	Modèle d'architecture logicielle	Propriétés logicielles / opinions des programmeurs (scores moyens)			
		Découplage objets métier - objets d'interaction.	Structurer le code en composants	Réutilisabilité des composants	Niveau de simplicité des composants
1	MVC standard	4.33	3.33	4	3.33
2	MVC optimisé	4.33	4.33	4	4.33
3	AMF-C	4.66	4	4.33	3.66

Le tableau 3.2 montre que le découplage entre les objets métier et les objets d'interaction est réalisé pour les trois implémentations (3/3 programmeurs sont satisfaits pour l'ensemble des modèles d'architecture). En outre, les programmeurs estiment que la structuration du code en composants peut être complexe en utilisant le modèle MVC standard (1/3 programmeur est satisfait). La complexité diminue considérablement avec le modèle MVC optimisé (3/3 programmeurs sont satisfaits) et avec le modèle AMF-C (3/3 programmeurs sont satisfaits). De plus, les participants estiment qu'ils sont en mesure de réutiliser les composants développés à travers un fragment de l'application et ceci quel que soit l'architecture utilisée (3/3 programmeurs sont satisfaits. Score moyen au moins égal à 4).

Malgré les différentes expériences de développement, les implémentations du fragment de l'application "aide à la maintenance d'un moteur de voiture par la réalité mixte" satisfont l'hypothèse de la réutilisation des composants et du découplage des objets en utilisant la méthode 2TUP étendue. Sur la base de cette évaluation, les expérimentations montrent des résultats encourageants concernant l'effectivité réelle de la méthode. Les programmeurs recommandent des évaluations plus poussées sur l'application en entier. Egalement, ils conseillent que les tests doivent être effectués sur plusieurs études de cas.

Notre enjeu sera d'étendre les expérimentations à une large échelle avec d'autres programmeurs, avec différents niveaux d'expériences. L'objectif est d'obtenir des résultats quantitatifs et qualitatifs significatifs pour valider la méthode, en particulier en ce qui concerne les interactions de réalité mixte. Plusieurs évolutions de la méthode 2TUP étendue peuvent, par conséquent, être envisagées.

III.7.2 Évaluation de la perception de la facilité d'utilisation de la méthode

La branche fonctionnelle de la méthode 2TUP étendue intègre une activité dense des spécialistes GL et IHM. La validation de cette activité est essentielle pour estimer la qualité de la méthode. Plus précisément, l'évaluation de la facilité d'utilisation de la méthode consiste à observer si la méthode 2TUP étendue permet aux acteurs de développement GL et IHM de construire leurs spécifications séparément et de confronter leur pratique de développement lors de l'activité de collaboration.

Pour mettre en œuvre cette évaluation, un protocole expérimental a été réalisé. Il s'agit d'impliquer quatre groupes de développeurs. Chaque groupe est composé de deux acteurs (universitaires et chercheurs ayant une expérience dans le développement): un assume à la fois les rôles des activités métier et GL, tandis que l'autre assume le rôle d'expert IHM.

En effet, deux séances de travail ont été organisées. La première séance est consacrée à une brève introduction, pour les huit (8) sujets, de la méthode 2TUP étendue, l'étude de cas et ses spécifications. L'étude de cas est une application d'aide à la maintenance d'un moteur de voiture, pour laquelle une solution post-WIMP interactive basée sur la réalité mixte est envisagée. Un intervalle de deux journées a séparé la deuxième session de la première, au cours de laquelle les participants ont travaillé seul pour

les activités de GL et d'IHM. Au cours de la deuxième session, il a été proposé de réaliser l'adaptation de leurs modèles.

Durant ces deux jours, divers moyens ont été mis à la disposition des participants: documents papier, un expert de l'industrie (domaine de la maintenance), des experts de la méthode et des outils (Internet, livres, etc.). Un entretien a été mené avec les participants à la fin de la deuxième session. Plusieurs composantes de la méthode ont été évaluées.

Un questionnaire a été adressé aux participants impliqués dans l'évaluation. Le tableau 3.3 énumère les opinions exprimées par ces participants. Chaque élément du questionnaire est noté sur une échelle de 1 à 5 (5: totalement d'accord, 4: d'accord, 3: moyen, 2: un peu en désaccord, 1: complètement en désaccord). En raison du nombre important de questions utilisées pour l'évaluation, nous avons reporté certaines d'entre-elles dans la section 4 de l'annexe B.

Tableau 3.3. Résultats des tests à travers le questionnaire adressé aux participants

N°	Question	Évaluateurs								Moyenne
		GL et Métier				IHM				
1	<i>La description des objets métier permet l'identification des tâches du point de vue IHM.</i>	-	-	-	-	4	4	4	4	4
2	<i>La spécification des besoins d'interaction permet de formaliser les objets d'interaction.</i>	-	-	-	-	4	4	4	5	4.25
3	<i>Le langage UML modélise les objets d'interaction.</i>	-	-	-	-	4	3	4	4	3.75
4	<i>Les objets d'interaction sont suffisamment détaillés.</i>	-	-	-	-	3	4	4	3	3.5
5	<i>Le processus de développement assure une relation permanente entre les objets d'interaction et les objets métier.</i>	4	5	4	4	3	4	4	5	4.125
6	<i>Le processus de développement assure un découplage des activités des experts.</i>	4	3	4	4	4	3	3	4	3.625
7	<i>Synchronisation des activités entre experts GL et IHM.</i>	4	4	4	3	4	3	4	4	3.75
8	<i>La représentation basée scénario décrit les tâches de l'utilisateur.</i>	4	4	3	4	4	4	3	5	3.875
9	<i>La transition scénario - modèle de tâches CTT est facile et compréhensible.</i>	5	4	4	4	4	4	3	5	4.125
10	<i>Le modèle CTT décrit les tâches d'une façon appropriée.</i>	4	5	5	4	5	5	4	4	4.5
11	<i>La transition modèle CTT - modèle IRVO est facile et compréhensible.</i>	-	-	-	-	4	3	4	3	3.5
12	<i>Le modèle IRVO est facile à apprendre et à utiliser.</i>	-	-	-	-	4	3	4	4	3.75
13	<i>Le modèle IRVO peut représenter tous les objets d'interaction.</i>	-	-	-	-	4	3	4	5	4
14	<i>Le diagramme IRVO permet de modéliser les relations entre les objets, physiques et numériques, et l'utilisateur.</i>	-	-	-	-	4	4	4	5	4.25
15	<i>La cohérence entre les diagrammes est pertinente.</i>	4	3	2	3	3	2	3	4	3

L'analyse du questionnaire montre que les objets 2TUP sont pertinents pour décrire à la fois l'espace métier et l'espace d'interaction. En outre, ces objets facilitent l'activité de synchronisation lorsque les experts GL et IHM collaborent. D'après l'opinion des experts IHM, les objets métier établis au cours des spécifications permettent d'établir les recommandations d'utilisabilité. Par conséquent, la modélisation des tâches utilisateur et le choix des types d'interaction (interface classique ou de réalité mixte) adaptés aux objets métier sont clairement établis (4/4 sujets sont satisfaits), cf. Question 1.

En outre, 7/8 sujets (cf. Question 5) considèrent que la connexion entre les objets métier et les objets d'interaction est facile à réaliser en utilisant respectivement les services des objets métier et des objets d'interaction. En outre, ils estiment que la relation "décrire" permet de formaliser la traduction des événements d'interaction en des événements métier. En outre, les sujets considèrent que l'utilisation des diagrammes UML lors de la phase d'analyse pour formaliser cette connexion est appropriée et facile à réaliser. Par exemple, la traduction de l'objet métier "étape de maintenance" dans l'espace d'interaction à travers les notions "flèche 3D", "texte 3D", "outil 3D" et "discours enregistré" est considérée comme pertinente.

Les questions, numéros 6 et 7 montrent que les participants, tout en préservant leurs modèles et outils, sont en mesure d'établir les spécifications de GL et d'IHM séparément. Ils réalisent, par la suite, une cartographie de ces spécifications (par exemple, la relation "décrire") au cours de la phase d'analyse en utilisant les diagrammes UML et les objets 2TUP. D'autre part, 6/8 sujets sont capables de synchroniser leurs tâches, c'est à dire, réaliser leurs activités en parallèle et ensuite collaborer pour unifier les objets produits à partir de chaque activité. Cependant, certains sujets (2/8), évaluent que la cartographie de ces objets peut être laborieuse et fastidieuse lorsque les experts ne possèdent pas le même niveau d'expérience.

L'utilisation de scénarii, décrits dans un langage naturel, facilite la formulation d'un arbre de tâches (7/8 sujets sont satisfaits), (cf. Question 9). Par exemple, les experts IHM utilisent le scénario projeté concret de l'activité "créer une étape de maintenance" afin de formaliser le diagramme de tâches à l'aide du formalisme « ConcurTaskTrees » (CTT) [141]. Cette traduction est considérée comme facile à réaliser par les sept (7) participants, sans connaissances préalables ou un code spécifique. Toutefois, un (1) expert estime qu'il n'est pas facile de formaliser implicitement le modèle CTT à partir des descriptions basées sur les scénarii.

Par ailleurs, l'utilisation de diagrammes comme CTT et IRVO, nécessaire à l'intégration des pratiques d'IHM, facilite aux experts l'activité de modélisation. Par exemple, les experts estiment que le modèle CTT (cf. Question 10) décrit les tâches de manière appropriée (satisfaction moyenne de 4,5/5). Ils trouvent que le modèle IRVO est facile à apprendre et à utiliser (trois des quatre experts sont satisfaits - l'un des participants (1/4) estime qu'un support d'aide sur la description du modèle IRVO est apprécié), (cf. Question 12). La conséquence est que la spécification des besoins d'interaction, impliquant les modèles précédents, permettent de formaliser les objets d'interaction (tous les experts IHM sont satisfaits avec une moyenne de 4,25/5, cf. Question 2).

Pour l'élaboration du modèle IRVO, les sujets utilisent d'abord la description des tâches utilisateur et définissent un premier ensemble de concepts pour construire les interactions (par exemple une flèche

3D pointe sur l'équipement concerné par la tâche de maintenance, un discours enregistré aide le réparateur sous forme d'instructions audio, un texte 3D décrit la tâche de maintenance, etc.). Sur la base de ces concepts, les sujets formalisent avec succès (cf. Question 11) le diagramme IRVO (exemple: mettre à jour une procédure de maintenance). 2/4 sujets estiment qu'il est nécessaire de fournir un outil d'aide expliquant comment construire les interactions à partir de l'analyse des tâches.

En outre, les experts IHM considèrent que le langage universelle UML utilisé dans la méthode 2TUP est un support léger pour la modélisation des objets d'interaction (trois des quatre experts sont satisfaits) et la description de la relation entre les espaces conceptuels GL et IHM (cf. Question 3). Par contre, le diagramme "UML tripartite", développée dans [94], [95], est considéré comme difficile à utiliser pour décrire les objets d'interaction. Il est aussi jugé lourd pour le nombre de modèles utilisés pour représenter à la fois les espaces GL et IHM. En effet, la structuration d'un processus métier en composants, entités et données de référence [94], est parfois laborieuse et nécessite une activité dense des spécialistes GL et IHM.

Enfin, les évaluateurs estiment que les modèles proposés sont suffisants pour modéliser les pratiques d'IHM dans le processus GL. Ils signalent, aussi, que la méthode n'est pas limitée aux modèles intégrés au cours de la phase des spécifications. Le contexte de conception d'IHM permet l'implication de modèles supplémentaires en cas de besoin.

Néanmoins, des efforts supplémentaires doivent être entrepris pour consolider la cohérence entre les modèles et les diagrammes lors de la synchronisation des activités de GL et d'IHM (cf. question 15). En effet, les participants observent un niveau de granularité hétérogène entre les concepts métier et interaction. Par exemple, les concepts "3DArrow" et "3DText" (cf. Figure 3.15) qui intègrent des attributs de position, taille, représentation visuelle, etc., contiennent une représentation plus dense comparativement à leur concept métier correspondant "étape de maintenance" qui inclut uniquement un attribut lié à la description textuelle de l'étape (contenu de la tâche de la maintenance). Les participants identifient un déséquilibre dans la densité des services proposés pour les deux concepts.

Une autre expérimentation a été menée avec d'autres participants, représentant des profils de réparateurs, pour valider certains produits de la phase de spécification des besoins. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4. Résultats des tests, questionnaire rempli par les utilisateurs finaux ou potentiels (réparateurs)

N°	Question	Utilisateurs				Moyenne
		Premier Utilisateur	Second Utilisateur	Troisième Utilisateur	Quatrième Utilisateur	
1	<i>La description basée scénario correspond aux attentes de l'utilisateur.</i>	4	5	4	3	4
2	<i>Le modèle de tâches est approprié aux tâches de l'utilisateur.</i>	5	4	4	3	4
3	<i>Le prototype proposé est bien conçu.</i>	4	4	3	2	3.25

Les résultats des tests présentés dans le tableau 3.4 montrent que le concept "scénario" est un langage adéquat pour décrire les intentions et les interactions de l'utilisateur (trois utilisateurs sont satisfaits). Les résultats confirment, encore une fois, la puissance des diagrammes des tâches pour modéliser les tâches de l'utilisateur (trois utilisateurs sur quatre sont satisfaits, moyenne des quatre participants est égale à 4/5).

Néanmoins, seuls 2/4 utilisateurs sont satisfaits à l'égard du prototype d'interface proposé. Certains utilisateurs (réparateurs numéro 3 et numéro 4) ne sont pas familiers avec les interfaces interactives et l'environnement virtuel. Ils estiment qu'il est difficile d'interagir avec les interfaces de réalité mixte en particulier lors de la manipulation des objets virtuels (réparateur numéro 4 est légèrement en désaccord). Ils considèrent qu'il faut plus de temps pour maîtriser les fonctionnalités de l'interface interactive. Pour répondre aux contraintes psychologiques et cognitives que présentent certains participants, le prototype d'interface peut être modifié, par les experts IHM, durant la phase de spécification des besoins d'interaction. Une solution alternative peut être envisageable. Il s'agit de renforcer la phase d'apprentissage, pour les participants, lors de l'utilisation d'interfaces interactives.

Enfin, les résultats obtenus dans [28], [29] montrent que les interfaces de réalité mixte développées permettent aux réparateurs d'effectuer des tâches de maintenance avec plus de précision lorsqu'un ensemble d'informations pertinentes (procédures de maintenance, pièces et outils de réparation, etc.) sont affichées sous forme d'augmentation 2D/3D sur leur environnement de travail. Ainsi, les risques d'accident peuvent être sensiblement réduits.

III.7.2.1 Discussion

Dans notre étude, nous avons examiné si les approches et modèles proposés à partir de la méthode 2TUP étendue supportent la collaboration entre les spécialistes GL et IHM. Pendant l'évaluation, tous les participants ont tenté de mettre en cohérence les produits provenant des espaces métier et interaction. Les sujets ont considéré que la méthode 2TUP étendue est intéressante car elle facilite les échanges entre les spécialistes GL et IHM.

La plupart des participants (6/8 sujets) considèrent que la méthode permet de gagner du temps dans la démarche de développement. En outre, tous les participants estiment que 2TUP peut éviter les erreurs, car elle permet une meilleure compréhension entre les individus de différents domaines. Ces participants jugent que la méthode 2TUP étendue peut être utilisée dans plusieurs projets de développement, notamment dans le cadre des systèmes interactifs mixtes. Leurs motivations sont: (1) la méthode est itérative et dirigée par les scénarii et les cas d'utilisation, (2) séparation des préoccupations de GL et d'IHM, (3) cadre précis pour la collaboration entre les différents spécialistes.

Néanmoins, les participants estiment que la méthode doit être déployée sur de grands projets impliquant un large échantillon de personnes.

Du point de vue de l'efficacité de la méthode, 6/8 sujets recommandent la méthode, car ils estiment qu'elle est facile à utiliser. Cependant, certains sujets (2/8) estiment qu'un processus d'apprentissage est nécessaire.

A la fin de la deuxième session, les sujets ont suggéré un ensemble de propositions dans le cadre de l'amélioration de la méthode:

- Identifier les situations où il est nécessaire de mettre en cohérence les diagrammes GL et IHM;
- Établir une documentation précise des activités de collaboration entre les spécialistes GL et IHM;
- Enrichir la phase de spécification des besoins d'interaction en considérant les contraintes de communication entre les utilisateurs et le système interactif mixte;
- Etablir un «fichier d'interaction» pour résumer toutes les activités, modèles et outils de la phase de spécification des besoins d'interaction ;
- Élaborer un support méthodologique pour décrire l'évolution des différents aspects de la méthode.

En somme, les sujets recommandent l'instrumentation de la méthode, en particulier, fournir un outil d'aide pour décrire l'organisation des tâches, des activités, des modèles et des codes dans le processus de développement. L'avantage, selon les opinions des sujets, consiste à tracer à la fois l'évolution des produits de chaque phase et l'activité de collaboration entre les spécialistes GL et IHM.

En se basant sur les observations formulées par les participants, une évolution de la méthode en termes de processus, modèles et langages est envisagée. Le tableau 3.5 résume les points forts et les points faibles de la méthode proposée.

Tableau 3.5. Performances de la méthode proposée

Points forts de la méthode 2TUP étendue	Points faibles de la méthode 2TUP étendue
<ul style="list-style-type: none"> - Méthode itérative dirigée par les scénarii et les cas d'utilisation. - Le prototypage du futur système est établi au début des spécifications. - Les besoins des utilisateurs sont considérés plus tôt dans le processus de développement. - Les participants, en préservant leurs modèles et outils, sont en mesure d'établir les spécifications GL et IHM séparément. Ils peuvent collaborer pour unifier les objets produits à partir de chaque activité. - Les objets 2TUP supportent la traduction des événements d'interaction en des événements métier. - Un cadre de travail clair et des modèles simples pour la collaboration. - L'organisation des processus métier et de l'espace d'interaction est basée sur le langage universel d'UML. - La description préliminaire des tâches est basée sur des scénarii naturels. - Les objets d'IHM pour les systèmes de réalité mixte peuvent être formalisés et intégrés dans les différentes phases du processus de développement. - Réutilisabilité et découplage des composants 2TUP. - D'autres modèles d'IHM peuvent être intégrés pour supporter la conception de l'interaction homme-machine. 	<ul style="list-style-type: none"> - La modélisation des artefacts 2TUP peut être laborieuse et fastidieuse lorsque les experts ne possèdent pas le même niveau d'expérience. - Niveau de granularité hétérogène entre les concepts métier et les concepts d'interaction. - Difficulté pour garantir la cohérence inter-diagrammes lors de la synchronisation des activités de GL et d'IHM. - Manque de supports et d'outils méthodologiques pour décrire l'activité de collaboration, les tâches et les modèles durant l'évolution des processus métier.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, un ensemble de principes et approches ont été proposés pour introduire la conception d'IHM dans un processus de développement. Dans notre approche, les pratiques d'IHM dans le cadre de la réalité mixte ont été intégrées dans une méthode basée métier permettant une meilleure prise en compte des besoins de l'utilisateur et une amélioration de la qualité du produit final. L'intégration des pratiques d'IHM est appliquée à la méthode de conception 2TUP du domaine du Génie Logiciel.

La méthode résultante est décrite et développée sur un cas d'étude. Il s'agit de concevoir une interface interactive de réalité mixte pour faciliter les tâches de maintenance (exemples: maintenance automobile et maintenance de systèmes de pompage photovoltaïque). Le principe est d'intégrer les besoins d'interaction dans la branche fonctionnelle du processus de développement 2TUP. Ceci consiste à identifier les objets d'interaction et les tâches utilisateur interactives pour concevoir un prototype d'interface utilisateur. Une relation entre les objets métier et les objets d'interaction est ainsi établie. Notre étude montre que les besoins d'interaction ont un impact sur la construction de l'espace métier et la conception de l'interface.

A la fin du chapitre, nous avons présenté les évaluations expérimentales réalisées sur deux aspects de la méthode proposée: l'effectivité réelle des modèles d'analyse, pour l'implémentation d'applications réutilisables et modulaires, suivant la méthode 2TUP étendue, et la facilité d'utilisation perçue des modèles GL et IHM ainsi que leurs mises en relation. Une discussion concernant les performances des modèles IHM intégrés a été, également, abordée. Les évaluateurs ont proposé un ensemble d'améliorations dans les performances de la méthode 2TUP étendue.

Nous signalons qu'une évaluation expérimentale exhaustive de la méthode passe par une comparaison avec d'autres cycles de développement classiques, tels que RUP, Agile ou d'autres méthodes. La mise en œuvre d'une telle expérimentation est toutefois longue et complexe, ce qui n'a pu être réalisé au cours de cette thèse.

Dans le chapitre suivant, nous présentons, du point de vue pratique, une démarche de développement des systèmes interactifs d'aide à la maintenance en se basant sur la méthode 2TUP étendue.

Chapitre IV Développement d'un système interactif mixte pour l'aide à la maintenance

IV.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les éléments nécessaires pour le développement d'un système interactif mixte d'aide à la maintenance. Cette étape constitue le résultat de l'application de la méthode 2TUP étendue proposée dans le précédent chapitre. Nous avons pour cela, développé des interfaces interactives multimodales et mobiles permettant à un réparateur, à partir d'un flux vidéo, de visualiser et d'interagir avec les modèles 2D/3D des procédures de maintenance recalés directement sur son environnement de travail. Un système coopératif d'aide à la maintenance (e-maintenance) a été, également, mis en œuvre permettant aux réparateurs (techniciens et experts), via un réseau de communication, d'échanger et de partager plusieurs types d'informations : représentations 2D/3D, messagerie, communication vocale, etc. Enfin, une phase expérimentale de notre travail a été abordée dans ce chapitre, en faisant appel à un groupe de réparateurs. En effet, le système interactif mixte que nous avons réalisé a été expérimenté sur les cas d'étude suivants: maintenance de voitures et maintenance d'une station de pompage photovoltaïque.

IV.2 Plateforme de maintenance basée sur la réalité mixte « ARIMA »

Nous avons proposé, au sein de notre équipe VAANIM¹ du CDTA², la plateforme de maintenance ARIMA (*Augmented Reality and Image processing in e-Maintenance Application*) [188]. Cette plateforme a été par la suite enrichie par l'intégration d'un système interactif d'aide à la maintenance composé de plusieurs modules. Ce système implémente les différentes technologies d'interaction (réalité mixte et multi-modalité) et utilise les réseaux de communication (services web, réseaux GSM, réseau Internet haut débit 3G++, etc.) comme moyens de coopération [27]. Cette plateforme permet à différents opérateurs, techniciens et experts en maintenance, d'accroître leurs capacités d'intervention dans un processus de maintenance. Elle permet aussi de réduire le temps et le coût induits de la réparation. La figure 4.1 montre l'architecture générale de la plateforme ARIMA enrichie [27].

Il s'agit d'une plateforme distribuée et coopérative permettant à plusieurs acteurs, de niveaux d'expérience différents, de coopérer en utilisant des dispositifs de traitement et de visualisation de données tels que les PDA, casques de visualisation, tablettes, smartphones, etc. La plateforme ARIMA peut être, aussi, étendue pour supporter l'activité collaborative (locale et distante) où plusieurs techniciens et experts peuvent travailler ensemble sur le même site pour résoudre un problème complexe.

Cette plateforme mobile de maintenance est basée sur des composants distribués entièrement décentralisés [189]. Elle est constituée d'un ensemble de services web qui interagissent via une architecture orientée service appelée "SOA" (Service Oriented Architecture) [91]. En effet, un service web est un ensemble de méthodes ou de services qui peuvent être accessibles à distance à travers un réseau local via Intranet ou un réseau distant via Internet. Pour ce dernier, les services web peuvent être invoqués ou sollicités à travers le réseau "World Wide Web", accessible via des protocoles standards d'Internet [189].

¹Vision Artificielle et ANalyse d'IMages

²Centre de Développement des Technologies Avancées

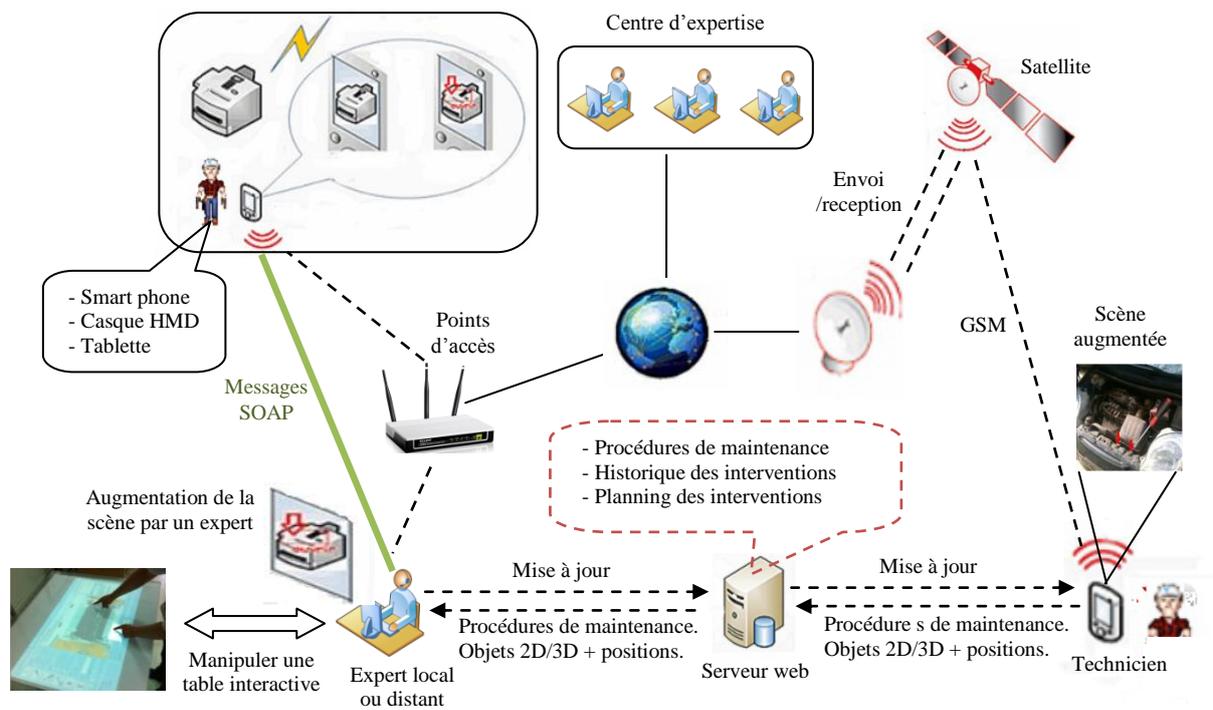


Figure 4.1 Architecture de maintenance développée dans notre laboratoire.

Les services web sont caractérisés par leur facilité de réutilisation. Ils sont indépendants des plateformes telles que Windows, Unix ou autre, et des langages de programmation tels que C#, Java, Visual Basic, etc. En outre, les services web peuvent gérer une variété de ressources matérielles telles que les PDA, Tablettes-Pc, casques de visualisation HMD, smartphones, etc. Cette forme d'interopérabilité fait des services web une des technologies les plus utilisées pour concevoir des applications distribuées [189]. Dans notre cas, nous avons adopté cette démarche pour développer une plateforme d'aide à la maintenance distribuée et mobile [27].

Du point de vue matériel, notre plateforme est déployée sur une architecture technique de type 3-tiers (ou 3-couches) contenant un serveur de base de données, un serveur web et des applications déployées sur plusieurs périphériques (Pc de bureau, Pc-portables, PDA, casques HMD, smartphones, etc.). La figure 4.2 montre l'architecture matérielle de notre plateforme.

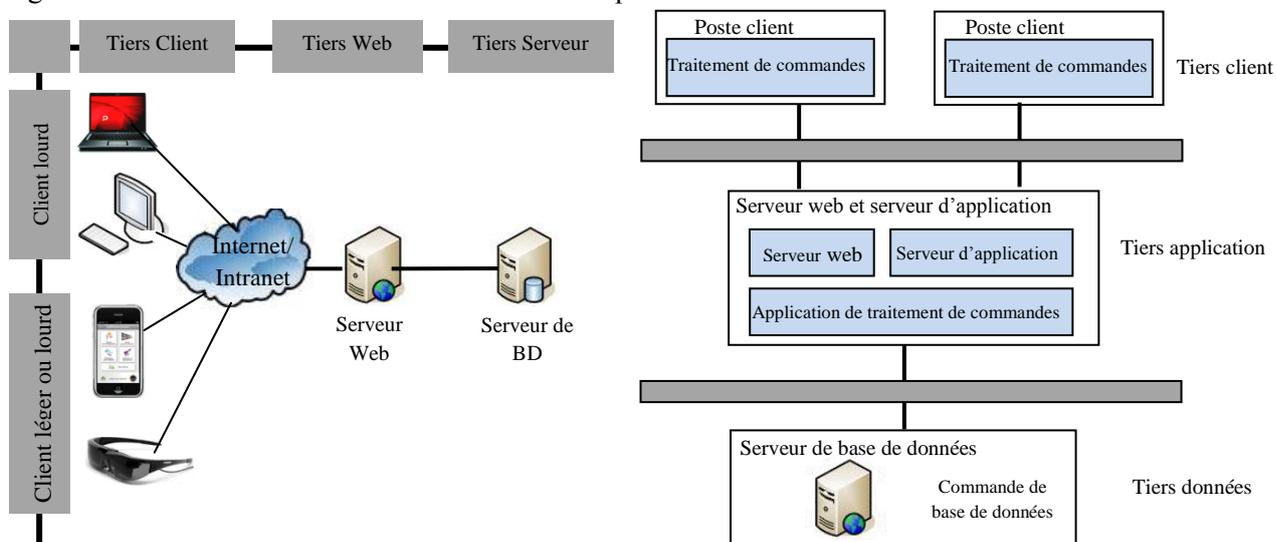


Figure 4.2 Architecture matérielle de notre plateforme ARIMA.

IV.2.1 Fonctionnement de la plateforme ARIMA

La plateforme proposée permet à plusieurs réparateurs, techniciens et experts de maintenance, de coopérer afin de diagnostiquer les pannes et de réaliser des tâches de maintenance sur divers équipements. Essentiellement, le technicien est muni d'un dispositif mobile pour faciliter son intervention. L'expert en maintenance (local ou distant) utilise souvent des dispositifs ayant des capacités de stockage et de traitement plus conséquentes (ex. Pc-Portable, Table interactive, etc.) afin d'aider le technicien par un ensemble d'instructions.

Dans notre cas, le processus d'intervention peut se présenter sous trois configurations possibles :

1. *Travailler en hors connexion* : le technicien utilise son dispositif mobile contenant une mini-base de données embarquée (cf. Figure 4.3). Cette base de données permet au technicien d'afficher les informations nécessaires au diagnostic et à la réparation sans être connecté au reste de la plateforme ARIMA. Cette configuration est intéressante dans certains cas où la connexion aux différents serveurs de la plateforme est faible ou subit des coupures courantes.

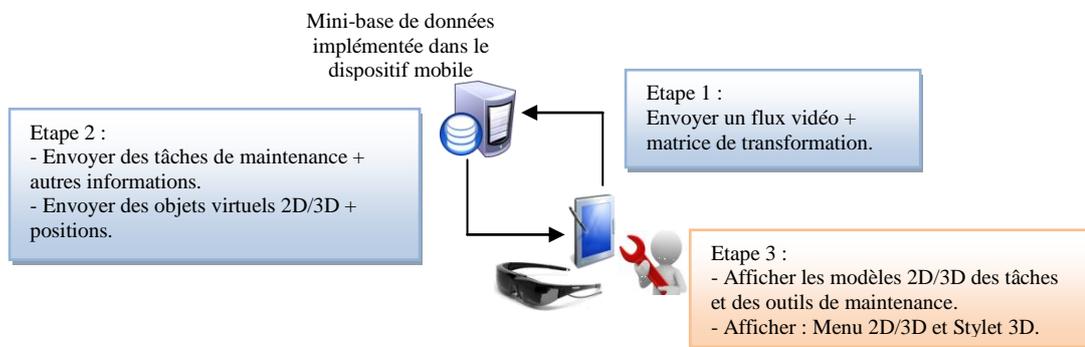


Figure 4.3 Le technicien travail avec son dispositif mobile (mode en hors connexion).

2. *Se connecter au serveur de base de données via un réseau local*: le dispositif mobile, muni par technicien, se connecte au serveur de base de données d'ARIMA afin de récupérer les différentes instructions de la procédure de réparation à exécuter (cf. Figure 4.4).

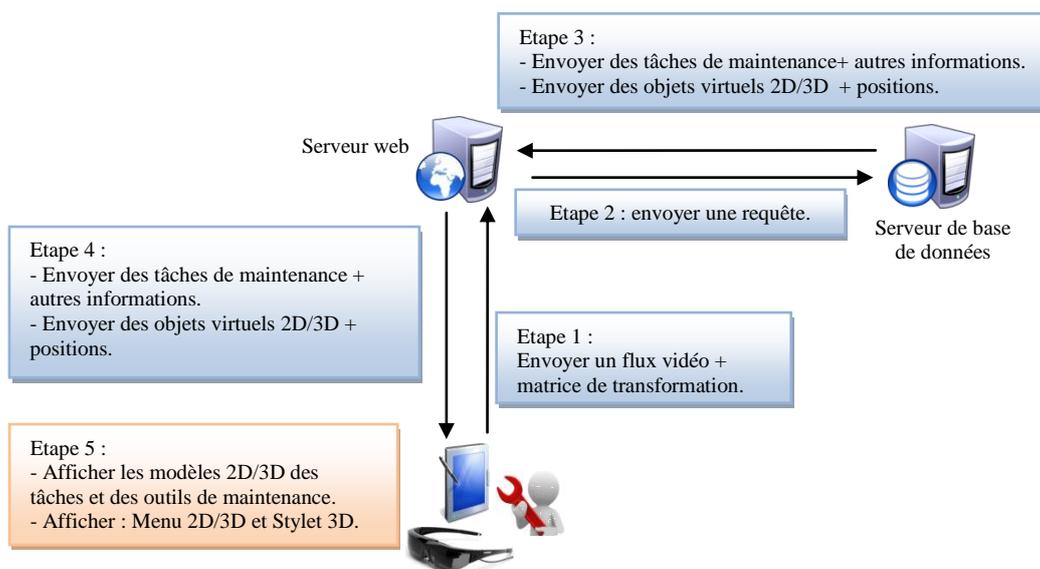


Figure 4.4 Le mobile du technicien se connecte localement aux serveurs de la plateforme ARIMA.

3. *Coopérer avec un expert distant* : le technicien capture une vidéo du lieu de la panne. La vidéo capturée est ensuite transmise à l'expert distant. L'expert ajoute des objets, virtuels décrivant le diagnostic et les procédures, sur la vidéo de la scène. Les objets virtuels insérés et leurs positions sont, ensuite, envoyés au dispositif mobile du technicien. Ces objets virtuels sont affichés dans leurs positions déjà affectées par l'expert distant (cf. Figure 4.5).

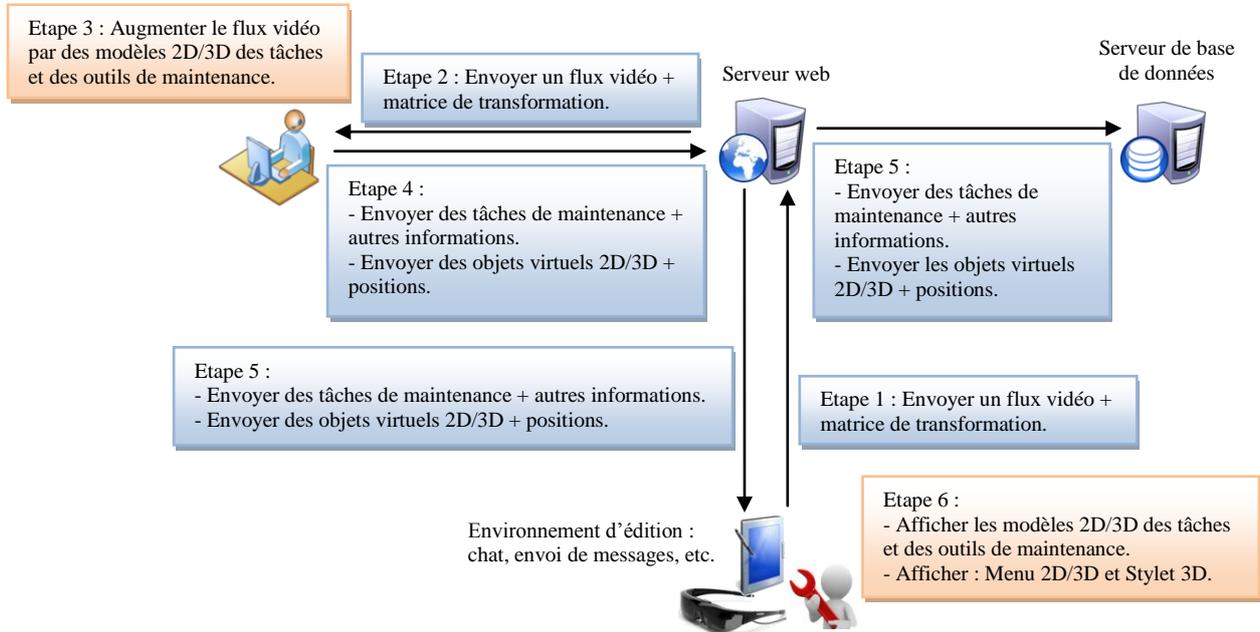


Figure 4.5 Processus de coopération entre un technicien et un expert.

IV.2.2 Scénario global de maintenance

D'une manière générale, le technicien utilise l'interface implémentée sur son dispositif mobile comme moyen d'assistance durant son intervention. Ici, le technicien est en face deux situations possibles :

1. Le technicien visualise directement les tâches de maintenance augmentées après avoir obtenu le diagnostic de l'équipement. Les tâches affichées sous forme de modèles 2D/3D sont insérées sur la vidéo filmant l'équipement et directement recalées sur le lieu de l'intervention. Le technicien procède, par la suite, à la réalisation de ces tâches.

2. Le technicien coopère avec un expert de maintenance dans le cas d'une nouvelle panne ou d'un diagnostic non répertorié dans la base de données. Dans ce cas, le serveur web établit un lien entre les deux acteurs afin d'engager un processus de coopération. Ce dernier consiste à échanger des informations via des outils comme le chat, la communication vocale et la vidéo enrichie par des objets virtuels. Une fois le dialogue achevé, l'expert envoie le diagnostic et la tâche de maintenance augmentés au dispositif d'affichage du technicien. Le dialogue se poursuit jusqu'à ce que le technicien soit capable de réparer l'équipement. Pour assurer un dialogue efficace, l'expert peut demander des informations supplémentaires auprès du technicien : historique des interventions, documentation de l'équipement, etc.

Dans les deux cas, lorsque l'intervention est accomplie, le technicien génère, à travers son interface mobile, un nouveau rapport d'intervention. Le réparateur peut ajouter à ce rapport des informations si nécessaire. Le rapport d'intervention est ensuite stocké dans l'historique des interventions au niveau du serveur de base de données d'ARIMA.

IV.3 Développement d'un système interactif mixte d'aide à la maintenance pour la plateforme ARIMA

En se basant sur les modèles décrits dans les phases de spécification de besoins et d'analyse de la méthode 2TUP étendue (cf. Section III.4.2 et section III.6 du Chapitre3), nous avons réalisé un système interactif mixte appelé "SIT-RM" (Système Interactif Tangible de Réalité Mixte) [30] pour supporter les activités de maintenance. Ce système a été, ensuite, intégré dans la plateforme ARIMA sous forme de modules [27]. "SIT-RM" peut interagir avec les autres composants de la plateforme comme le diagnostic, le pronostic, la GMAO, la logistique, le SCADA et le portail Web. Grâce à la plateforme ARIMA, le réparateur peut être guidé à distance, par un expert, et ceci en utilisant le système "SIT-RM".

Le développement de ce module se base sur le fait que le réparateur doit être capable de visualiser et d'interagir directement avec des augmentations insérées dans la scène vidéo en temps réel de sorte qu'il arrive à comprendre les tâches à réaliser. La figure 4.6 illustre les modules du système interactif tangible que nous avons développé.

"SIT-RM" implémente des interfaces interactives et multimodales permettant aux agents de maintenance de visualiser, à travers un flux vidéo, des données diverses (diagnostics, procédures et documentation de maintenance, films de démontages, données capteurs, des enregistrements vocaux, animations, etc.) décrites sous forme de représentations 2D/3D, directement recalées sur leur environnement de travail. Ces agents peuvent interagir avec ces interfaces (menu virtuel, objets virtuels, touches tactiles, interactions tangibles, etc.) pour réaliser des tâches supplémentaires d'une façon interactive (exemple: mise à jour d'une procédure de maintenance, mise à jour d'un diagnostic de pannes, ajout d'équipements, etc.).

La figure 4.6 montre que le système "SIT-RM" est constitué de plusieurs modules [30]: module de suivi/recalage, module de rendu, module d'interaction 2D/3D, module "générateur multimédia" et couche "interface interactive mobile". Nous décrivons dans ce qui suit le mode de fonctionnement de chacun de ces modules.

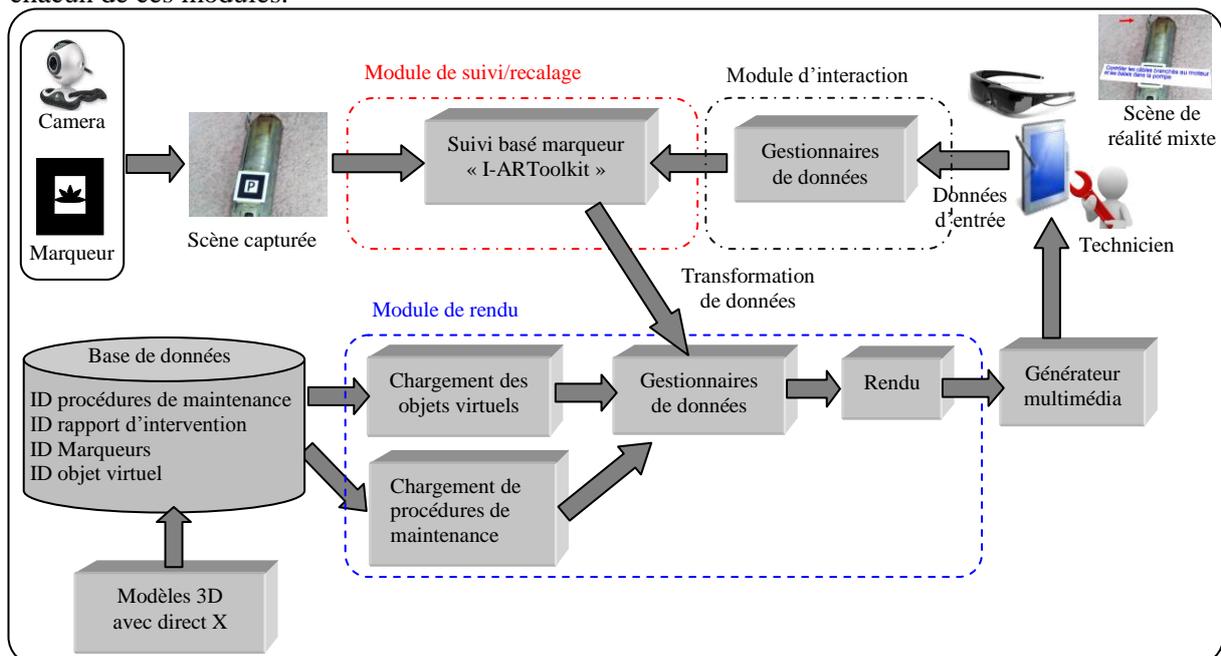


Figure 4.6 Modules du système interactif tangible développé.

IV.3.1 Module de suivi/recalage

Ce module permet de construire une application de réalité mixte combinant des entités virtuelles avec les éléments physiques du monde réel. Son rôle est d'assurer la cohérence de ces deux mondes par rapport au point de vue de l'utilisateur.

Plusieurs méthodes de suivi ont été proposées dans la littérature [40], [90], [102], [113], [167]. En se basant sur l'étude comparative des différentes méthodes effectuée dans [30] et en considérant l'environnement de travail dans lequel le réparateur évolue, la méthode de suivi basée sur les cibles codées semble être la plus adéquate. ARToolkit (Augmented Reality Toolkit) [113], qui représente la méthode de suivi la plus populaire, utilise les techniques de vision par ordinateur pour calculer la position et l'orientation d'une caméra, filmant la scène réelle, par rapport à des cibles (ou marqueurs) physiques. La transformation du système de coordonnées de la camera vers le marqueur permet au programmeur de dessiner des objets 3D et de les insérer correctement dans la scène réelle. Grâce à cette transformation, le recalage et le suivi des objets virtuels par rapport au flux vidéo de la scène réelle sont garantis. Ceci est aussi valable lorsque la caméra change de position. La transformation camera-marqueur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & T \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Où (x_c, y_c, z_c) et (x_m, y_m, z_m) représentent les systèmes de coordonnées respectivement dans le plan de la camera et du marqueur. R est la matrice de rotation (3x3) et T est le vecteur de translation (3x1).

ARToolkit utilise plusieurs marqueurs sous forme d'un carré noir contenant un code appelé motif (cf. Figure 4.7). Un marqueur possède une forme simple qui peut être facilement reconnue et identifiée. D'autre part, le choix porté sur ARToolkit est justifié par le fait qu'il peut être implémenté dans des dispositifs de caractéristiques matérielles et logicielles différentes, tels que les Pc-portables, les smartphones, les tablettes-Pc et les casques de visualisation.

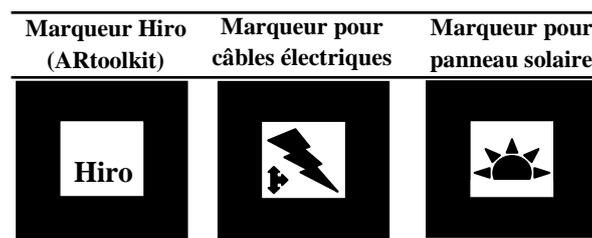


Figure 4.7 Exemples de marqueurs d'ARToolkit conçus pour nos applications.

Dans notre laboratoire, nous avons déjà utilisé cette librairie pour réaliser des applications de réalité mixte [26]. Cependant, les résultats obtenus montrent que le suivi avec ARToolkit souffre de l'instabilité des objets virtuels. Ainsi, le réparateur peut être induit en erreur par le mauvais positionnement des représentations 2D/3D des tâches de maintenance.

Pour résoudre ce problème, une version améliorée d'ARToolkit appelée i-ARToolkit (improved ARToolkit) a été proposée [20], [27]. L'objectif est de résoudre certaines anomalies d'ARToolkit. Dans notre cas, nos propositions ont concerné les aspects suivants :

1. les marqueurs ne peuvent pas être détectés lorsque le niveau de luminosité varie. ARToolkit utilise un seuillage statique pour la binarisation de la vidéo capturée. Cependant, la variation du niveau de luminosité conduit à une variation du seuil de binarisation. ARToolkit, ne peut, dans ce cas, binariser correctement la vidéo capturée. Dans i-ARToolkit, la méthode d'Otsu [139] basée sur le seuillage dynamique a été appliquée afin de garantir une binarisation correcte du flux vidéo, malgré la variation du niveau de luminosité. Nous avons adopté, dans ce cas, l'approche de seuillage hybride. Cette approche utilise deux types de seuil : (1) seuillage statique ou manuel et seuillage dynamique basé sur la méthode d'Otsu [139].

2. Les objets virtuels superposés deviennent instables lorsqu'ils sont loin du centre du marqueur détecté ou lorsque leur taille est grande. Nous avons observé l'apparition du phénomène d'incertitude au niveau de la matrice de transformation camera-marqueur pour un même point de vue de la caméra. L'approche implémentée dans i-ARToolkit prend en considération cette incertitude et fournit une matrice de transformation constante.

IV.3.1.1 Seuillage dynamique pour la reconnaissance des marqueurs

Connu aussi sous le nom de « seuillage optimal », le seuillage dynamique est basée sur les valeurs des niveaux de gris dans l'image. Dans le cas où la luminance varie, la valeur du seuil change. Nous utilisons la méthode d'Otsu [139] pour calculer le seuil de l'image à chaque changement de luminosité, et ceci, pour une scène réelle contenant des marqueurs d'ARToolkit [20].

La méthode d'Otsu calcule le seuil binaire (binarisation) des images en niveaux de gris en se basant sur l'histogramme normalisé de l'image [139]. Il s'agit d'une méthode de classification non supervisée pour calculer automatiquement un seuil global à partir de l'histogramme d'une image divisée en premier plan et arrière-plan.

Supposons que l'histogramme de l'image ne contient que deux classes, le principe d'Otsu est de trouver le point qui minimise la variance intra-classe ou qui minimise la propagation des niveaux de gris de chaque classe (cf. Figure.4.8) [139].

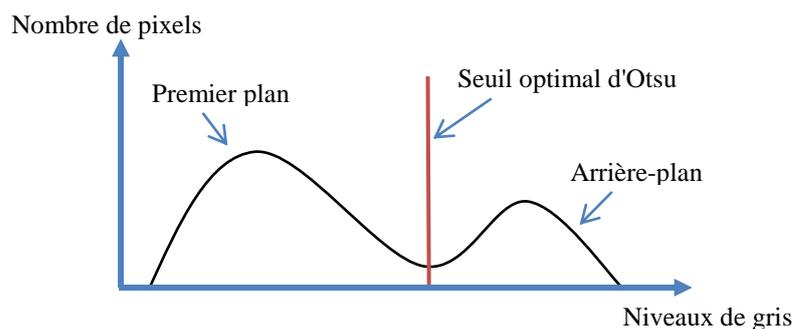


Figure 4.8 Schéma montrant le seuil optimal d'Otsu.

Le calcul de la valeur optimale d'Otsu s'effectue par l'algorithme suivant [139]:

1. Calculer l'histogramme normalisé p donnée par l'équation 2.

$$p(i) = \frac{n_i}{N} \quad (2)$$

Avec:

n_i : nombre de pixels qui possèdent la valeur du niveau de gris "i".

N : nombre total de pixels dans l'image.

2. En se basant sur les informations données par l'histogramme, nous calculons, par la suite, la probabilité des classes $\omega(k)$ pour i allant de 1 à k et pour i allant de $k+1$ à N . La probabilité $\omega(k)$ pour i allant de 1 à k est donnée par l'équation 3 ci-dessous :

$$\omega(k) = \sum_{i=1}^k p(i) \quad (3)$$

La probabilité $\omega(k)$ pour i allant de $k+1$ à N peut être déterminée par l'expression : $1 - \omega(k)$.

3. L'étape suivante consiste à calculer le niveau moyen de la classe k pour i allant de 1 à k . Ce niveau moyen est représenté par l'équation de $\mu(k)$ donnée par l'expression suivante :

$$\mu(k) = \sum_{i=1}^k i \cdot p(i) \quad (4)$$

4. Ce processus est ensuite répété pour calculer le niveau total moyen $\mu(L)$ de l'image. Le calcul $\mu(L)$ est donné par l'équation 5.

$$\mu(L) = \sum_{i=0}^L i \cdot p(i) \quad (5)$$

Avec:

L : nombre total des niveaux de gris dans l'histogramme.

5. Sur la base des différentes variables calculées précédemment, la variance intra-classe pour le niveau k -ième peut être calculée par l'équation 6 :

$$\partial^2(k) = \frac{[\mu(L) \cdot \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k) \cdot [1 - \omega(k)]} \quad (6)$$

6. Le seuil optimal ($\partial_{\text{optimal}}$) est calculée quand la valeur de l'équation (6) est maximale :

$$\partial_{\text{optimal}} = \max (\partial^2(k))_{0 \leq k \leq 255} \quad (7)$$

IV.3.1.2 Stabilisation des objets virtuels

Pour obtenir des objets virtuels stables dans la scène, la solution consiste à calculer une matrice de transformation unique (camera-marqueur) pour un même point de vue de la caméra et/ou de l'utilisateur. Notre objectif est d'éliminer, dans ce cas, la variation de la matrice de transformation due à l'instabilité des objets virtuels. Pour ce faire, nous proposons l'algorithme suivant [20]:

1. Calculer, en temps réel, et pour une séquence d'images, un intervalle d'incertitude " I " donné par l'expression suivante :

$$I = E \cdot x / d \quad (8)$$

Avec:

x : distance caméra – marqueur,

d : taille du marqueur carré,

E : erreur due au suivi d'ARToolkit (valeur obtenue graphiquement par le calcul des marges d'erreurs d'un objet virtuel instable).

Pour calculer la valeur de " E ", nous avons pris des échantillons d'images d'une scène contenant un marqueur carré (cf. Figure 4.9). En variant le point de vue de la caméra et la taille d du marqueur (cf. Figure 4.9), nous avons calculé pour chaque échantillon d'images la distance moyenne « \bar{x} », et l'écart Δx entre la plus grande distance (x_{max}) et la plus petite distance (x_{min}). Ces deux distances représentent les points extrêmes de détection du marqueur.

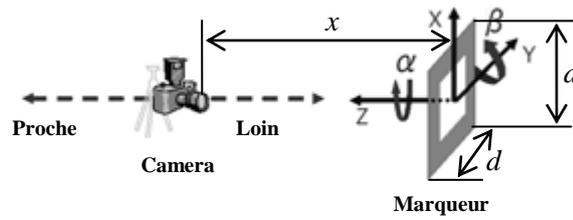


Figure 4.9 Positionnement d'une caméra par rapport à un marqueur.

Par la suite, nous avons représenté graphiquement l'évolution du rapport $\frac{\Delta x}{\bar{x}}$ en fonction de la taille d du marqueur, c'est à dire :

$$\frac{\Delta x}{\bar{x}} = f(d) \quad (9)$$

Et le graphe obtenu est illustré par la figure 4.10.

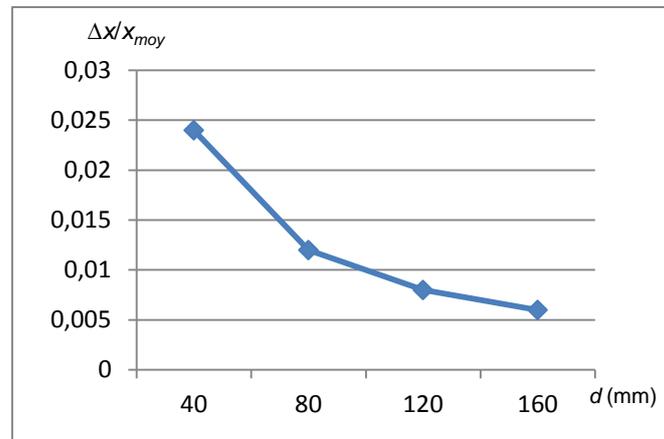


Figure 4.10 Représentation graphique de l'expression $\frac{\Delta x}{\bar{x}} = f(d)$.

D'après ce graphe, l'équation (9) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{\Delta x}{\bar{x}} = E' \cdot \frac{1}{d} \quad (10)$$

Ainsi, nous pouvons écrire l'expression de E' :

$$E' = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot d \quad (11)$$

Pour déduire la valeur de E' , nous avons calculé la pente de la courbe décrite dans la figure 4.10. Le résultat obtenu correspond à la constante E' et est égal à 0,96. La valeur de E qui représente l'erreur due au suivi d'ARToolkit est calculée par l'expression suivante :

$$E = I - E' \quad (12)$$

2. Calculer, pour le même point de vue de la caméra, la différence entre deux matrices de transformation correspondantes à deux captures vidéo successives. Dans le cas où la différence est inférieure à la valeur de l'incertitude I , la première matrice est prise en compte pour les deux captures vidéo. Dans le cas contraire, c'est la deuxième matrice qui est considérée.

En résumé, l'algorithme de stabilisation des objets virtuels que nous avons proposé est donné comme suit [20] :

d : taille du marqueur carré ;
E' = 0.96; *E* = 0.04;
*M*₁: matrice de transformation précédente (première capture vidéo);
*M*₂: matrice de transformation actuelle (deuxième capture vidéo);
x' : distance camera-marqueur précédente ;
x : distance camera-marqueur actuelle ;
M: matrice de transformation résultante;
 Pour chaque image capturée
 Faire
 Détecter le marqueur
 Calculer la matrice *M*₁ pour *x'*
 Calculer la distance *x* et la matrice *M*₂
 Calculer l'incertitude $I = E \cdot x / d$
 Si ($|x - x'| < I$) alors $M = M_1$,
 Sinon $M = M_2$,
 Fin

IV.3.1.3 Algorithme global

Les améliorations apportées à ARToolkit à travers les algorithmes présentés dans les sections IV.3.1.1 et IV.3.1.2, nous ont permis d'introduire la méthode « i-ARToolkit » [20]. L'implémentation de cette méthode est basée sur l'algorithme suivant [20], [27] :

Etape 1 : ouvrir le flux vidéo
Etape 2 : pour chaque image capturée :
 2.1 calculer la valeur optimale du seuil en utilisant l'approche hybride de binarisation [20];
 2.2 transformer l'image capturée en une image binaire en utilisant la valeur du seuil calculée ;
 2.3 détecter un (des) carré(s) noir(s) de(s) marqueur(s) implémenté(s) dans l'image ;
 2.4 calculer la position et l'orientation de la caméra (calcul de la matrice de transformation) ;
 2.5 appliquer l'algorithme de stabilisation des objets virtuels à la matrice de transformation [20];
 2.6 superposer les objets virtuels sur l'image capturée.

Notons que l'application de l'algorithme de stabilisation des objets virtuels (étape 2.5) suppose que la caméra filmant la scène est fixe par rapport aux marqueurs. En pratique, cette configuration n'est pas toujours valable. Dans plusieurs situations, l'utilisateur (exemple: opérateur de maintenance) est muni d'un dispositif de réalité augmentée mobile où la position de la caméra est variable. Pour cela, nous avons envisagé d'améliorer l'algorithme de stabilisation des objets virtuels en introduisant dans i-ARToolkit, le concept de matrice de transformation globale caméra-marqueurs. Pour ce faire, nous nous basons sur les travaux présentés dans [90].

IV.3.1.4 Choix de marqueurs pour réaliser une opération de maintenance

Pour afficher correctement les représentations virtuelles des tâches de maintenance sur le lieu de l'intervention et éviter les erreurs d'interprétation de ces tâches, la configuration des marqueurs d'i-ARToolkit doit être soigneusement choisie et placée dans l'environnement de travail du réparateur. Notre but est, donc, de déterminer la taille du marqueur T qui permet d'afficher les modèles 3D des procédures de maintenance d'une façon stable et correctement recalés sur la vue du réparateur même si ce dernier change de position.

Nous avons constaté, expérimentalement, que ceci est réalisable lorsque le marqueur est suffisamment reconnu et détecté. Dans ce cas, nous avons examiné si un marqueur peut être détecté à différentes tailles (d), avec différentes conditions de distance (x) et d'angle de rotation (Ω) entre la caméra et le marqueur ($5^\circ \leq \Omega \leq 175^\circ$) (cf. Figure 4.11).

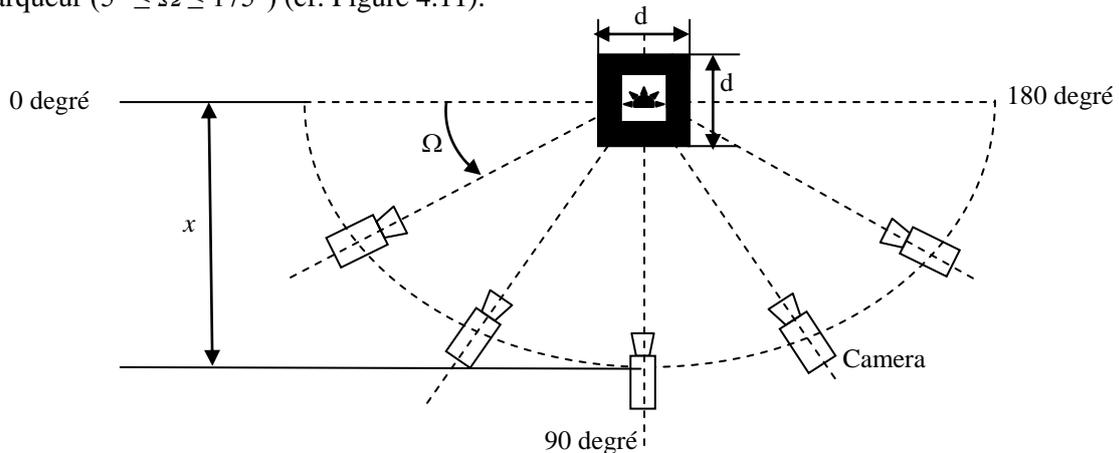


Figure 4.11 Taille du marqueur (d -mm) en fonction à la distance (x -mm) et de l'angle (Ω -degré).

Les paramètres pouvant affecter les mesures ont été pris en considération : (1) luminosité, (2) uniformité de l'arrière-plan, (3) calibration de la caméra.

Des expérimentations ont été réalisées pour déterminer le taux de reconnaissance pour un ensemble de marqueurs les plus souvent utilisés (liste non exhaustive) : (marquer N°1, $d = 20$ mm), (marquer N°2, $d = 30$ mm), (marquer N°3, $d = 40$ mm), (marquer N°4, $d = 60$ mm), (marquer N°5, $d = 80$ mm) et (marquer N°6, $d = 100$ mm). Le tableau 4.1 montre l'évolution du taux de reconnaissance du marqueur de taille $d = 40$ mm. Pour les autres marqueurs, les résultats sont donnés dans la section 1 de l'annexe C.

Les angles de rotation de la caméra par rapport au marqueur varient de 5° à 175° avec un échantillonnage de 15° . Les distances évoluent de 250 à 3000 mm avec un incrément de 250 mm. Nous présentons dans cette section, les résultats des expérimentations effectuées pour $\Omega \in [5^\circ, 90^\circ]$. En effet, nous avons observé qu'il y a une symétrie des valeurs par rapport à l'angle $\Omega = 90^\circ$. Ainsi, les résultats obtenus pour les angles de rotations Ω allant de 90° à 175° sont similaires aux résultats obtenus pour l'intervalle des angles ($5^\circ \leq \Omega \leq 90^\circ$).

Tableau 4.1. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°3 de taille $d=40\text{ mm}$

Rotation angle (degree)	Distance between camera and marker (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,923	0,891	0,948	0,823	0,688	0,662	0,484	0,432	0,370	0,314	0,289	0,238
75	0,916	0,872	0,866	0,788	0,676	0,652	0,460	0,410	0,360	0,292	0,279	0,224
60	0,912	0,872	0,844	0,739	0,688	0,643	0,431	0,400	0,347	0,270	0,246	0,215
45	0,908	0,861	0,817	0,712	0,663	0,638	0,409	0,392	0,339	0,261	0,234	0,209
30	0,868	0,845	0,806	0,704	0,648	0,630	0,393	0,372	0,327	0,245	0,227	0,194
15	0,853	0,837	0,791	0,713	0,462	0,421	0,379	0,330	0,315	0,243	0,215	0,179
5	0,817	0,803	0,500	0,474	0,219	0,203	0,180	0,165	0,134	0,119	0,085	0,065

Les valeurs en gras représentent les taux de reconnaissance avec des valeurs supérieures ou égal à 0,8.

Selon les résultats des expérimentations, le taux de reconnaissance est supérieur à 0,8 lorsque la caméra peut s'éloigner jusqu'à 1000 millimètres du marqueur et ceci pour un angle de rotation de 90 degrés (cf. Tableau 4.1). Dans le cas où l'angle de rotation est entre 15 et 75 degrés, la même situation est observée lorsque le marqueur est distant de 750 millimètres de la caméra. Le taux de reconnaissance est inférieur à 0,7 pour toutes les distances supérieures à 1250 mm, quelque soit l'angle de rotation Ω .

En plus, il a été observé que le marqueur permet une superposition correcte des objets virtuels lorsque le taux de reconnaissance est au moins égal à 80% (0,8). Cette information nous a permis d'introduire un paramètre qui nous renseigne sur la relation entre la distance d et le taux de reconnaissance. Nous appelons ce paramètre "distance maximale de détection (d_{detect_max})". Il consiste à déterminer la distance maximale "camera-marqueur" avec laquelle un marqueur est détecté, c'est-à-dire le taux de reconnaissance est supérieur ou égal à 0,8). Par exemple, la distance maximale de détection pour le marqueur de taille $d=40\text{ mm}$ est de 500 mm lorsque l'angle de rotation caméra/markqueur est de 5 degrés (cf. Tableau 4.1).

Lorsque la distance camera-marqueur est supérieure à d_{detect_max} le taux de reconnaissance devient inférieur à 80%. Nous considérons que le marqueur n'est pas détecté.

Ainsi, nous avons adopté ce principe pour déterminer, expérimentalement, la distance maximale de détection pour les marqueurs de tailles de 20 mm, 40 mm, 30 mm, 60 mm et 100 mm pour $\Omega \in [5^\circ, 90^\circ]$. Les résultats de ces expérimentations sont récapitulés dans la figure 4.12.

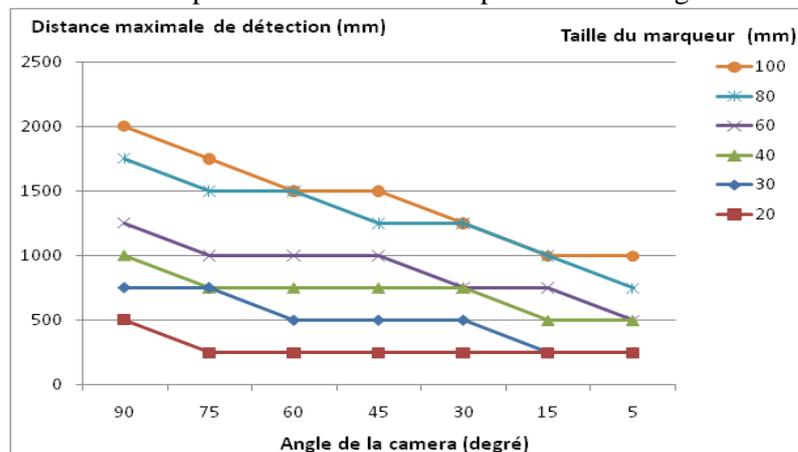


Figure 4.12. Détermination de la distance maximale de détection (d_{detect_max}) pour différents marqueurs.

Comme présentée dans la figure 4.12, la distance d_{detect_max} est maximale lorsque la taille du marqueur est grande et l'angle de rotation égale à 90 degrés (le plan de la caméra est parallèle au plan du marqueur). A titre d'exemple, le marqueur N°5 de taille de 80 mm situé en face de la caméra (angle de rotation de 90°) peut être détecté à une distance $d_{detect_max} = 1750$ mm. Ainsi, l'utilisateur peut aller jusqu'à cette distance pour visualiser correctement les objets 3D.

Réciproquement, la distance de détection d_{detect_max} diminue lorsque la taille du marqueur est de plus en plus petite ou lorsque l'angle de rotation se rapproche de 5 degrés (ou s'éloigne de 90 degrés). Par exemple, pour le marqueur N°2 de 30 mm de taille, la distance maximale de détection d_{detect_max} ne dépasse pas 500 mm pour un angle de rotation de 30 degrés.

IV.3.2 Module d'interaction 2D/3D

Ce module permet à l'utilisateur d'interagir avec des modèles 2D et 3D (menu virtuel 2D, animations 3D, objets 2D/3D, etc.) recalés sur la vidéo de la scène réelle (cf. Figure 4.13).

La principale forme d'interaction, dans notre étude, est basée sur l'utilisation d'un stylet virtuel 3D. En effet, nous avons affecté à un marqueur tangible de i-ARToolkit le modèle 3D du stylet (cf. Figure 4.13). Ce modèle 3D est affiché une fois le marqueur tangible est détecté et reconnu. Lorsque l'utilisateur bouge le marqueur, le stylet suit le mouvement de ce dernier. L'utilisateur muni de ce stylet lui permet de percevoir le contact qu'il effectue avec des objets purement virtuels dans son environnement de travail (cf. Figure 4.13). Nous nous sommes inspirés du mode de fonctionnement de la souris pour établir les différents modes de contact. Nous introduisons deux modes : mode "sélection" (cf. Figure 4.13a) et mode "validation" (cf. Figure 4.13b). Le passage d'un mode à un autre mode s'effectue par un changement physique, réalisé par l'utilisateur, du motif du marqueur tangible. Le mode "sélection" permet, à la fois, à l'utilisateur d'interagir avec le menu virtuel 2D et de sélectionner des objets virtuels 2D/3D. Le mode "validation" permet d'exécuter les opérations effectuées dans le mode sélection (exemple: valider la sélection d'une rubrique dans le menu virtuel, manipuler les objets virtuels). Le passage du mode "validation" au mode "sélection" permet de mettre fin à une opération en cours d'exécution dans le mode "validation". Ce passage est nommé "désélection".

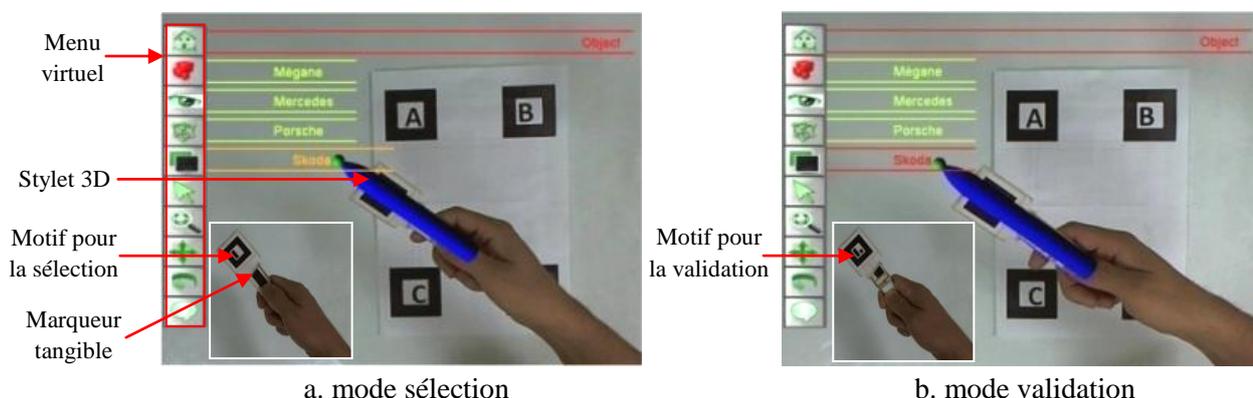


Figure 4.13 Stylet virtuel affiché sur un marqueur tangible et utilisé pour interagir avec des objets virtuels.

Le mode de fonctionnement du module d'interaction 2D/3D est principalement basé sur les propriétés de i-ARToolkit en termes de reconnaissance de marqueurs, recalage, suivi et rendu. L'algorithme ci-dessous résume le mode de fonctionnement du module d'interaction 2D/3D :

1. Transformation de coordonnées du stylet de l'espace 3D vers l'espace 2D

$Pi_3D(X3d, Y3d, Z3d)$: coordonnées 3D de l'extrémité du stylet ;
 $pi_2D(x2d, y2d)$: coordonnées 2D de l'extrémité du stylet par rapport à l'écran ;
stylet : instance de la classe Stylet3D ;
 $stylet.x2d = ((X3d/ Z3d) * Largeur_Ecran + Largeur_Ecran/2)$;
 $stylet.y2d = ((Y3d/ Y3d) * Longueur_Ecran + Longueur_Ecran/2)$;

2. Test de contact du stylet 3D avec un objet 3D

X_1, X_2 : points d'extrémité selon l'axe X d'un cube 3D enveloppant l'objet 3D ;
 Y_1, Y_2 : points d'extrémité selon l'axe Y d'un cube 3D enveloppant l'objet 3D ;
 Z_1, Z_2 : points d'extrémité selon l'axe Z d'un cube 3D enveloppant l'objet 3D ;
Marqueur_doigt_1 : premier marqueur associé au stylet ;
Marqueur_doigt_2 : deuxième marqueur associé au stylet ;
ObjetV : instance de la classe Objet3D ;
ObjetM : instance de la classe ObjetMenu2D ;

Si

$(X_1 < X3d < X_2)$ et $(Y_1 < Y3d < Y_2)$ et $(Z_1 < Z3d < Z_2)$

Alors

//Stylet est dans la zone de l'objet 3D

ObjetV.Selection = vrai ;

Sinon

//Stylet est en dehors de la zone de l'objet 3D

ObjetV.Selection = faux ;

Fin

3. Test de contact du stylet 3D avec le menu virtuel 2D

x_1, x_2 : points d'extrémité selon l'axe X d'un carré 2D enveloppant le menu 2D ;
 y_1, y_2 : points d'extrémité selon l'axe Y d'un carré 2D enveloppant le menu 2D ;

Si

$(x_1 < x2d < x_2)$ et $(y_1 < y2d < y_2)$

Alors

//Stylet est dans la zone du menu virtuel

ObjetM.Selection = vrai ;

Sinon

//Stylet est en dehors de la zone du menu virtuel

ObjetM.Selection = faux ;

Fin

4. Click sur l'objet 3D

Si

$(ObjetV.Selection = vrai)$ et $(Marqueur_doigt_1 = faux)$ et $(Marqueur_doigt_2 = vrai)$;

Alors

//Faire un événement de clique sur l'objet 3D

ObjetV.Validation = vrai ;

Fin

5. Click sur les objets du menu virtuel 2D

Si

(ObjetM.Selection = vrai) et (Marqueur_doigt_1 = faux) et (Marqueur_doigt_2 = vrai) ;

Alors

//Faire un événement de click sur le menu virtuel

ObjetM.Validation = vrai ;

Fin

6. Translation d'un objet 3D

Si (ObjetV.Validation = vrai) ;

Alors

ObjetV.Translation.x = (ObjetV.Translation.x + X3d) // Translation selon l'axe X

ObjetV.Translation.y = (ObjetV.Translation.y + Y3d) // Translation selon l'axe Y

ObjetV.Translation.z = (ObjetV.Translation.z + Z3d) // Translation selon l'axe Z

Fin

IV.3.3 Module de rendu

Le module de rendu permet de charger des modèles 2D/3D, des sources vidéo et d'autres données (diagnostics, procédures de maintenance, etc.) à partir de la base de données. En analysant l'entrée de l'utilisateur et le contexte environnemental, ce module sélectionne les modèles 2D/3D appropriés et les embarque, en connaissant leurs coordonnées, sur la scène contenant un référentiel unique ou plusieurs référentiels. Ces repères sont en général reliés aux marqueurs physiques insérés dans la scène. Le module de rendu utilise les données issues du module de suivi afin de synchroniser les propriétés des objets virtuels et du flux vidéo de la scène réelle.

D'autre part, le module de rendu effectue un re-rendu des modèles 2D/3D selon les interactions effectuées par l'utilisateur, et des retours (feedback) des résultats de ces interactions vers la vue de l'utilisateur, ce qui peut modifier le modèle 2D/3D d'origine ou générer de nouveaux modèles 2D/3D.

Les objets 2D/3D sont modélisés et stockés sous format Direct 3D de Direct X. La plupart des progiciels commerciaux supporte la conversion en Direct X.

IV.3.4 Module générateur multimédia

Ce module génère des contenus multimédia à partir de la scène virtuelle rendue, de telle sorte que l'utilisateur peut facilement visualiser et manipuler ces contenus multimédia affichés sur la scène réelle.

IV.3.5 Couche « Interface »

L'interface développée contient toute les fonctionnalités nécessaires pour réaliser des tâches de maintenance. Essentiellement, l'interface intègre un espace d'acquisition de flux vidéo de la scène pour afficher les différents modèles 2D/3D. Un espace interactif est offert à l'utilisateur afin d'interagir avec les différents modèles 2D/3D affichés et les objets numériques appartenant à l'interface. Dans ce contexte, nous avons développé plusieurs types d'interfaces en fonction des dispositifs d'affichage utilisés. Nous nous sommes basés sur les dispositifs mobiles. Ces derniers sont caractérisés par leur espace de stockage, de traitement et d'affichage de données réduites. Le vrai challenge consiste à développer des interfaces interactives et multimodales sur ces supports mobiles.

IV.4. Expérimentation

IV.4.1 Système interactif mixte pour la maintenance des systèmes de pompage photovoltaïque (PV)

Nous avons développé le système interactif tangible de réalité mixte "SIT-RM" pour supporter les tâches de maintenance de la station de pompage photovoltaïque (PV) implantée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) sis à Bouzareah, Alger. Les figures 4.14 et 4.15 montrent les composants de la station de pompage [42].



Figure 4.14 Système de pompage



Figure 4.15 Générateur photovoltaïque.

Le tableau 4.2 ci-dessous présente quelques pannes de la station de pompage, leurs diagnostics et les procédures de maintenance correspondantes [11], [42].

Tableau 4.2. Pannes et procédures de maintenance de la station de pompage PV

<i>Panne/défaillance</i>	<i>Diagnostic</i>	<i>Procédure de maintenance</i>
Panne du générateur	Manque d'électricité.	Tâche: vérifier si un ou plusieurs câbles sont déconnectés.
	Alimentation faible.	Tâche: nettoyer le panneau solaire.
Panne de connexion	Câbles rouillés.	Tâche: nettoyer la connexion.
Pompe en panne	Pompe bloquée.	Tâche: débloquer la pompe.
Groupe motopompe en panne	Pompe ne fonctionne pas.	Tâche 1: vérifier l'état de l'interrupteur principal, Tâche 2: vérifier le fonctionnement des shunts, Tâche 3: vérifier le niveau dans le puits de forage, Tâche 4 : contrôler les câbles branchés au moteur et les balais dans la pompe.

Les interfaces interactives développées dans le système "SIT-RM" fournissent au réparateur, se trouvant sur le site de la station de pompage, diverses informations (procédures, pannes/défaillances, diagnostics, valeurs des capteurs, etc.) sous forme de modèles 3D superposés sur son plan de travail. Lorsque le réparateur se déplace autour de la station, ces modèles 3D maintiennent un alignement correct avec l'environnement physique, et ce, grâce au module i-ARToolkit. De plus, le système "SIT-RM" constitue un service d'aide pour l'apprentissage destiné aux réparateurs non expérimentés.

Avant d'utiliser le système "SIT-RM", des marqueurs de différentes tailles ont été placés dans des endroits précis du système de pompage photovoltaïque, ceci en considérant les contraintes liées à l'espace de travail du réparateur et à l'emplacement des pièces. En se basant sur les résultats présentés dans la figure 4.12, nous avons opté pour des marqueurs de 80 mm et 100 mm (cf. Figure 4.16). Pour visualiser correctement les différentes informations, il est recommandé de choisir des endroits particuliers comme les angles droits, espaces plats, zones peu encombrées, etc, pour placer ces marqueurs.



a. Marqueur de taille $d=100\text{ mm}$ collé sur le puits b. Marqueur de taille $d=80\text{ mm}$ collé sur la pompe
 Figure 4.16. Marqueurs collés sur des composants du système de pompage PV.

Une fois les marqueurs placés, le système "SIT-RM" est mis en marche. En effet, ce système reçoit un ensemble de données (états des composants, types de pannes, mesures des capteurs, etc.) à partir du module de diagnostic développé dans [13]. Ce module fait partie de la plateforme d'e-maintenance en cours de développement [66] pour la supervision de la station de pompage.

Le module de diagnostic qui récupère les données à partir des capteurs installés sur les composants du système de pompage, identifie et localise les dysfonctionnements et/ou les pannes. La figure 4.17 montre le schéma de principe du système de pompage PV reliés à plusieurs capteurs [13], [98] donnés comme suit :

- capteur de pression différentielle pour la mesure du niveau d'eau dans le puits à 1 bar (C1).
- capteur de pression manométrique de sortie de la pompe à tester à 1 bar (C2).
- capteur de pression manométrique de sortie de la pompe à tester à 12 bars (C3).
- débitmètre pour la branche de 32 mm de diamètre (C4).
- débitmètre pour la branche de 50 mm de diamètre (C5).
- capteur de niveau d'eau du réservoir (C6).
- capteur de pression d'air dans le réservoir (C7).

Ces capteurs envoient périodiquement des données au module de diagnostic [13]. Ce module traite ces données et envoie les résultats de diagnostic à un serveur central. Ce dernier transmet ces résultats, via un réseau sans fil, aux appareils mobiles (smartphone, tablette PC, casque de visualisation HMD, etc.) utilisés par les réparateurs. Le module de suivi/recalage proposé dans la section IV.3.1, et développé pour ces dispositifs, transforme les résultats du diagnostic en représentations 2D/3D. Ces dernières sont affichées sur la scène vidéo vue par le réparateur et directement superposées sur le composant en panne.

Par exemple, lorsque le capteur de niveau d'eau *C1* détecte une anomalie, le module de diagnostic transmet les données, via un serveur web et un serveur de base de données, vers la tablette MSI WindPad 110W du réparateur. Ce dernier prend sa tablette MSI WindPad 110W et tourne la caméra vers l'équipement sur lequel des marqueurs sont collés. Une fois un de ces marqueurs est détecté, des objets 3D qui représentent le contenu du diagnostic sont insérés dans la scène. Un message s'affiche, demandant au réparateur de tourner la caméra de la tablette vers le puits de forage d'eau. Le résultat du diagnostic, affiché en 3D, indique que le groupe motopompe à l'intérieur du puits de forage ne fonctionne pas (cf. Figure 4.18).

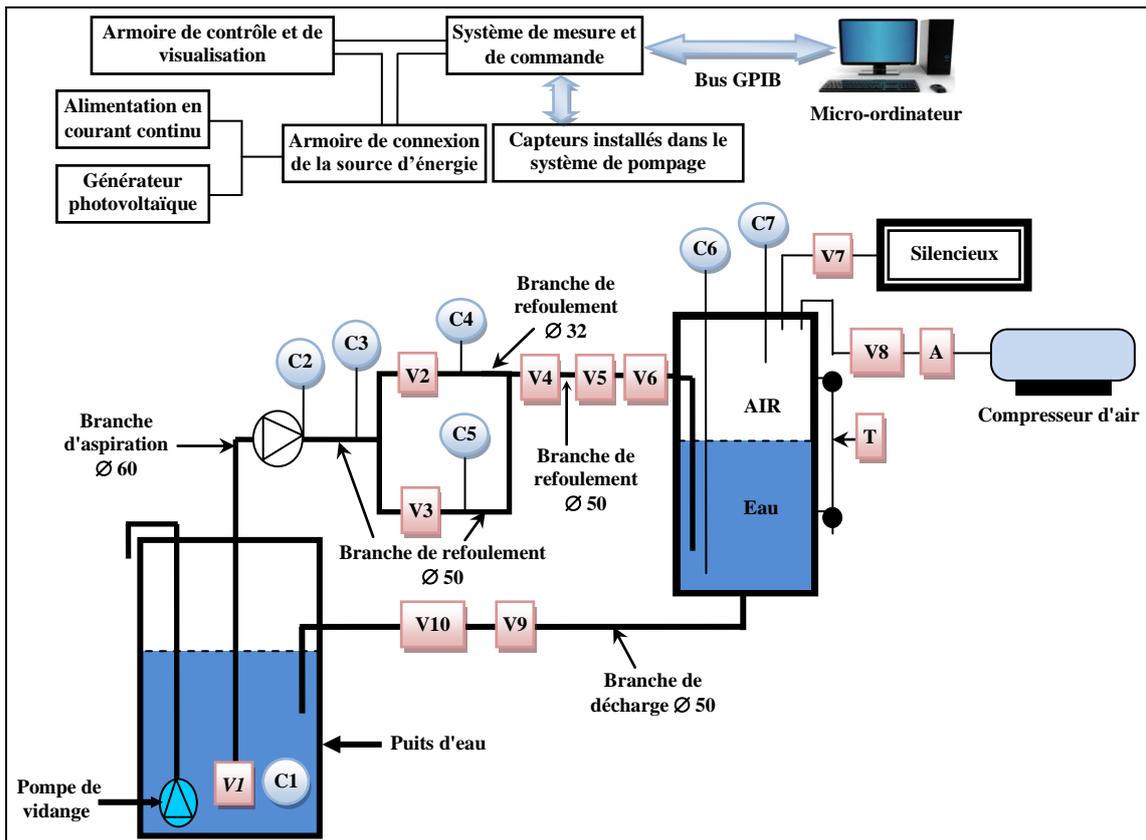


Figure 4.17 Schéma montrant l'emplacement des capteurs dans un système de pompage PV.



Figure 4.18 Diagnostic du groupe motopompe représenté sous forme 3D.

Par la suite, le réparateur sélectionne l'élément "pompe ne débite pas" dans la liste des diagnostics proposés (cf. Figure 4.19). Une procédure de maintenance, constituée de quatre tâches, est ensuite proposée au réparateur.

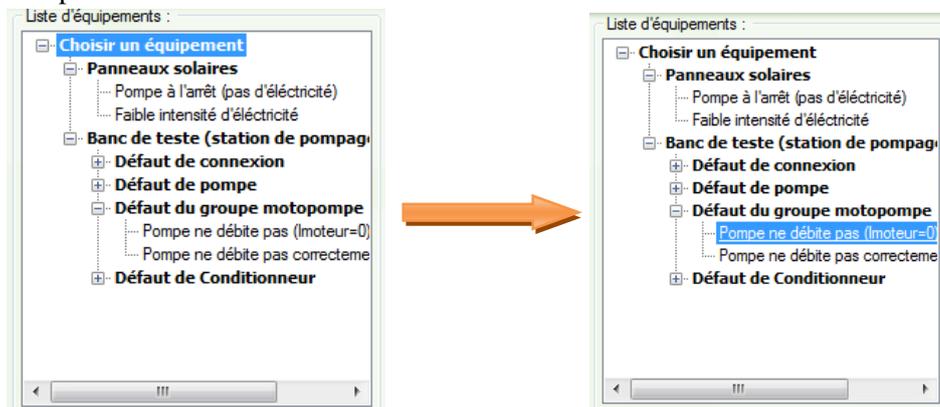


Figure 4.19 Liste des diagnostics affichés sur l'interface de la tablette MSI WindPad 110W.

La première tâche consiste à "vérifier l'état de l'interrupteur" de l'interrupteur principal. La figure 4.20 représente cette tâche sous forme d'augmentations. Ces dernières sont composées des textes 3D et flèches 3D. Les textes 3D représentent le nom du composant (interrupteur principal) ainsi que la description de la tâche de maintenance (vérifier l'état de l'interrupteur). Les flèches 3D pointent sur le composant concerné.



Figure.4.20 Tâche augmentée N°1: "vérifier l'état de l'interrupteur".

Une fois la première tâche réalisée, le réparateur affiche la tâche suivante. Elle consiste à vérifier le fonctionnement des shunts dans l'armoire de contrôle manuel et de visualisation (cf. Figure 4.21). Les shunts défectueux sont alors remplacés.



Figure.4.21 Tâche augmentée N°2: "vérifier le fonctionnement des shunts".

Ensuite, le réparateur visualise les prochaines tâches qui consistent à vérifier le niveau d'eau dans le puits de forage s'il n'est pas sous un certain seuil (tâche N°3). Il contrôle, aussi, les câbles branchés au moteur et les balais à l'intérieur du groupe motopompe (tâche N°4), (cf. Figure. 4.22).

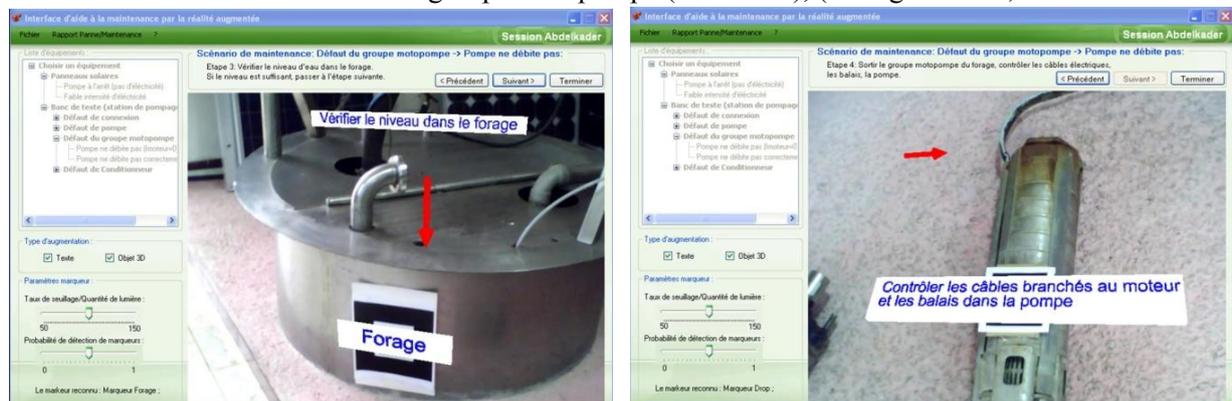


Figure.4.22 Tâches augmentées N°3 : "vérifier le niveau dans le puits" et N°4: "contrôler le groupe motopompe".

IV.4.2 Système interactif mixte pour la maintenance des moteurs de voiture

Vu la forte demande exprimée à l'égard de l'activité de maintenance dans l'industrie automobile, nous sommes intéressés à proposer des prototypes d'interfaces interactives pour la maintenance automobile. Ce choix provient du fait que l'industrie automobile constitue un créneau prometteur en Algérie, avec l'intention affichée par certains constructeurs à savoir Renault, Hyundai et Faw à implanter des usines de construction automobile. L'une des exigences de ces entreprises est d'avoir un service de maintenance performant.

Dans ce contexte, nous avons testé le système interactif "SIT-RM" que nous avons proposé dans la maintenance automobile. En effet, nous avons utilisé le système interactif tangible de réalité mixte "SIT-RM" pour supporter les tâches de maintenance des moteurs de voiture de types "Peugeot 206" et "Chevrolet Spark". Nous avons répertorié un ensemble de pannes communes aux deux moteurs pour valider nos tests. Le tableau 4.3 ci-dessous illustre certaines pannes répertoriées pour les deux moteurs, leurs diagnostics et les procédures de maintenance correspondantes.

Tableau 4.3. Pannes répertoriées et leurs procédures de maintenance correspondantes (cas de deux moteurs de voiture)

<i>Panne/défaillance</i>	<i>Diagnostic</i>	<i>Procédure de maintenance</i>
Moteur ne démarre pas	Bougies défectueuses.	Tâche: remplacer les bougies.
Tâches d'huile dans la bonbonne d'eau de refroidissement	Problème au niveau du bloc moteur.	Tâche 1: vérifier l'état de la culasse. Tâche 2: vérifier le joint de culasse.
Vibration de la voiture	Vibration du moteur.	Tâche: remplacer le support moteur.
Volant du conducteur	Difficulté à tourner le volant.	Tâche: vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.

Des marqueurs de différentes tailles ($d=40$ mm, $d=60$ mm et $d=80$ mm) ont été placés dans des endroits précis des deux moteurs en considérant les contraintes liées à l'espace de travail du réparateur et à l'emplacement des pièces dans les deux moteurs (cf. Figure 4.23). Ces marqueurs servent de repères pour incruster correctement les modèle 2D/3D des tâches de maintenance à réaliser.

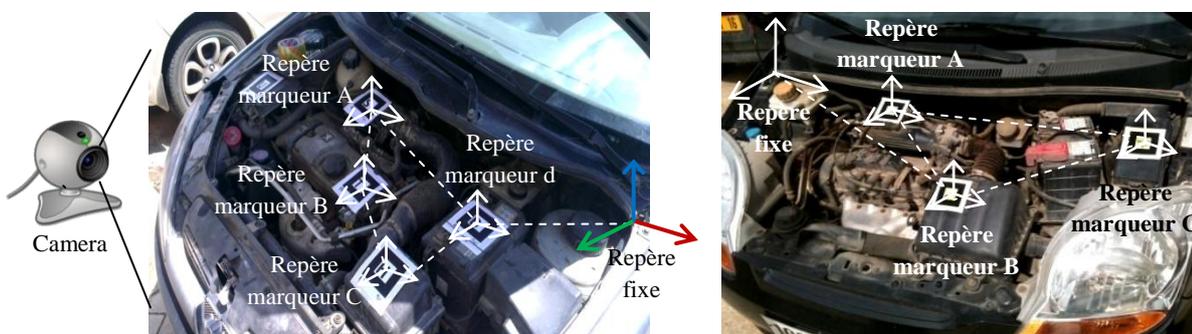


Figure 4.23. Marqueurs collés sur les moteurs Peugeot 206 (à gauche) et Chevrolet Spark (à droite).

Pour visualiser les différents objets virtuels sur le lieu de l'intervention, les réparateurs utilisent deux dispositifs mobiles comme supports d'aide, un smartphone et un casque HMD.

IV.4.2.1 Système interactif d'aide sur le smartphone Samsung Galaxy S1

Le réparateur oriente son smartphone vers le moteur de Peugeot 206. Il choisit un type de pannes parmi celles répertoriées dans la liste des types de pannes (cf. Figure 4.24). Un diagnostic de l'équipement est proposé au réparateur (cf. Figure 4.24). Une fois la rubrique diagnostic est sélectionnée, une procédure de maintenance augmentée s'affiche sur le smartphone. Les figures 4.25 et 4.26 montrent deux (2) exemples de tâches de maintenance affichées sur le smartphone Samsung Galaxy S1: (1) remplacer les bougies et (2) vérifier l'huile dans la boîte de de la direction assistée.



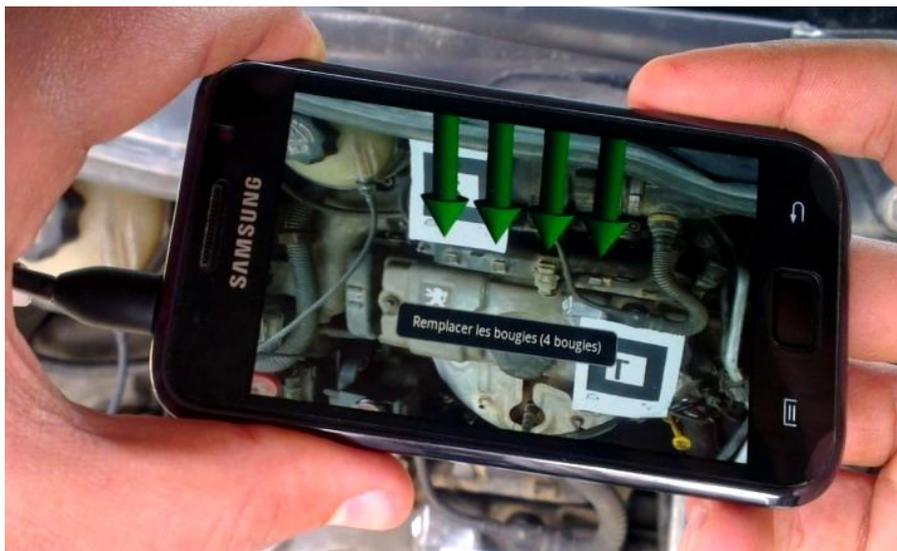
Figure 4.24 Liste de pannes et diagnostics répertoriés sur le smartphone Samsung Galaxy S1.

Dysfonctionnement au niveau du moteur Peugeot 206 (cf. Figure 4.25)

Panne : moteur ne démarre pas.

Tâche de maintenance : remplacer les bougies.

Augmentations utilisées : quatre flèches 3D en couleur verte et un texte 2D en couleur blanche sur un fond noir.



Tâche augmentée : remplacer les bougies (4 bougies).

Figure 4.25. Interface interactive sur Samsung Galaxy S1 pour la maintenance du moteur Peugeot 206.

Dysfonctionnement du volant du conducteur (cf. Figure 4.26)

Défaillance : Difficulté à tourner le volant.

Tâche de maintenance : vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.

Augmentations utilisées : une flèche 3D courbé en couleur rouge, une flèche 3D en couleur verte et un texte 2D en couleur blanche sur un fond noir.



Tâche augmentée: vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.

Figure 4.26 Interface interactive sur Samsung Galaxy S1 pour la maintenance du moteur Peugeot 206.

IV.4.2.2. Système interactif d'aide à la maintenance sur le casque HMD vidéo Vuzix Wrap 920AR

Nous avons repris les mêmes exemples de la section précédente pour développer une interface interactive sur le casque vidéo HMD Vuzix Wrap 920AR (cf. Figure 4.27). Par rapport à l'utilisation du smartphone, le casque HMD permet au réparateur de travailler en utilisant ses deux mains.

Le réparateur est doté d'un marqueur placé sur son index droit. Ce marqueur permet d'afficher un stylet 3D pour interagir avec les objets virtuels de l'interface interactive. La figure 4.27 montre que le réparateur souhaite avoir un enregistrement vocal de la tâche de maintenance à réaliser sur le moteur Chevrolet Spark.

Dysfonctionnement au niveau du moteur Chevrolet Spark (cf. Figure 4.27)

Panne : moteur ne démarre pas.

Tâche de maintenance : remplacer les bougies.

Augmentations utilisées : trois flèches 3D en couleur rouge et un texte 3D en couleur rouge sur un fond transparent.

Composants d'interaction utilisés : un **stylet 3D** en couleur bleu interagit avec un **menu virtuel 2D** et des **icônes 3D**.

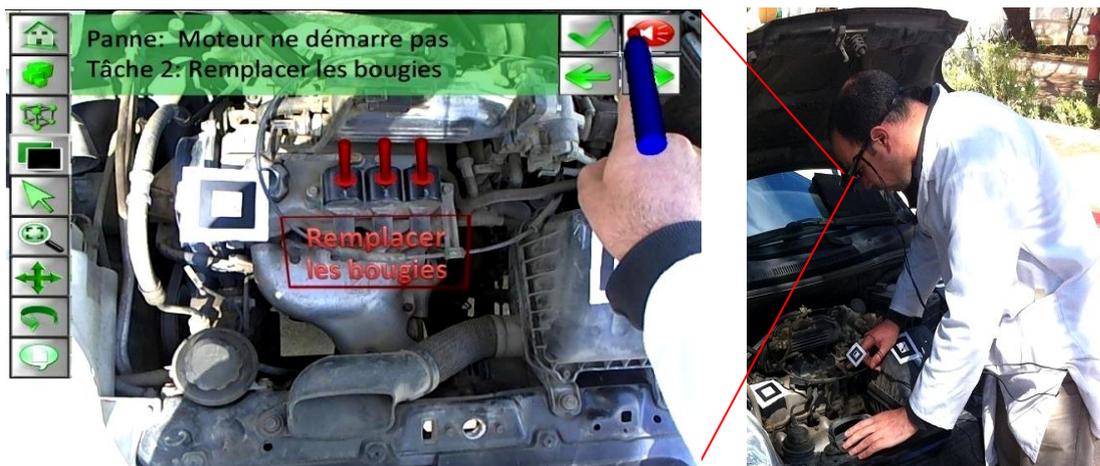


Figure 4.27 Interface interactive sur casque HMD Vuzix pour la maintenance du moteur Chevrolet Spark.

IV.5 Evaluations expérimentales du système "SIT-RM"

A l'issue de ces expérimentations, nous avons évalué les performances du système "SIT-RM" développé. Pour cela, nous avons effectué des tests de performances pour les différents aspects de ce système, à savoir le suivi, l'interaction, l'affichage des objets 3D, etc. Nous avons aussi évalué le comportement des réparateurs vis-à-vis des prototypes d'interfaces développés.

IV.5.1 Evaluation expérimentale de la méthode de suivi/recalage développée « i-ARToolkit »

Plusieurs expérimentations ont été réalisées pour évaluer la méthode de suivi développée. Nous avons, pour cela, évalué la précision de positionnement des augmentations 2D/3D dans la scène réelle de l'utilisateur en utilisant les marqueurs de i-ARToolkit.

Dans ces expérimentations, nous avons mesuré les variations des erreurs de position et d'orientation pour un objet virtuel positionné au centre d'un marqueur carré de 80 mm de taille, placé sur l'équipement. Les marges des erreurs de position et d'orientation sont calculées pour différentes distances et angles de rotation entre la caméra et le marqueur. Les figures 4.28, 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 et 4.33 montrent les résultats de ces expérimentations.

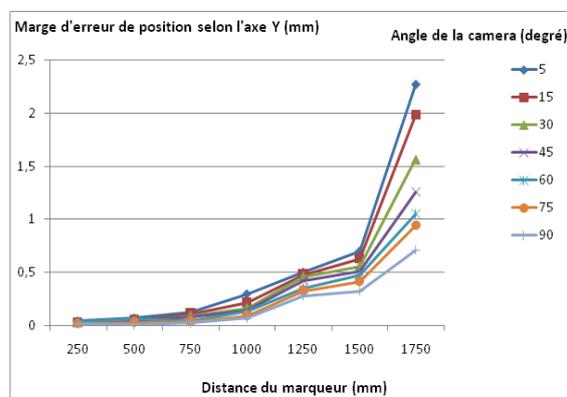
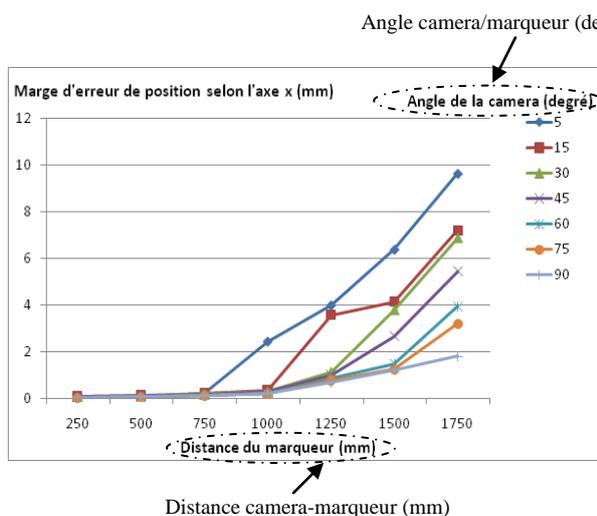


Figure 4.28 Marges des erreurs de position selon l'axe X

Figure 4.29 Marges des erreurs de position selon l'axe Y

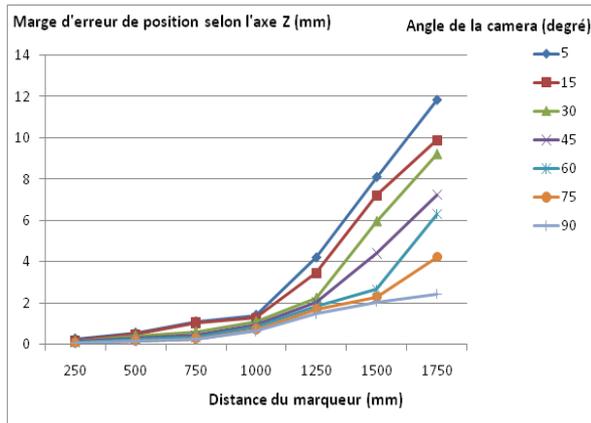


Figure 4.30 Marges des erreurs de position selon l'axe Z

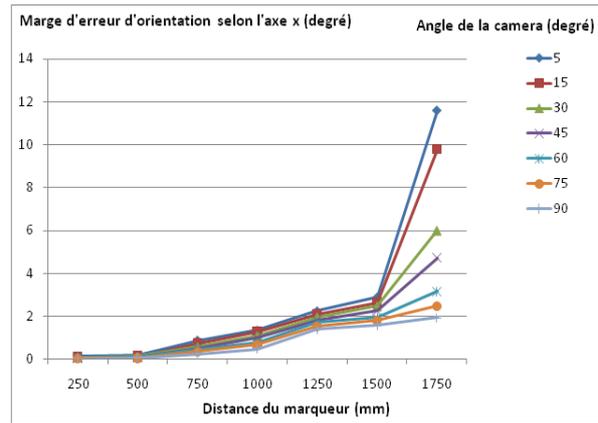


Figure 4.31 Marges des erreurs d'orientation selon l'axe X

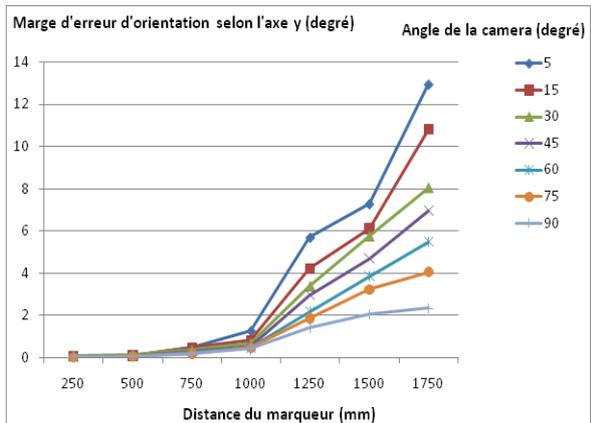


Figure 4.32 Marges des erreurs d'orientation selon l'axe Y

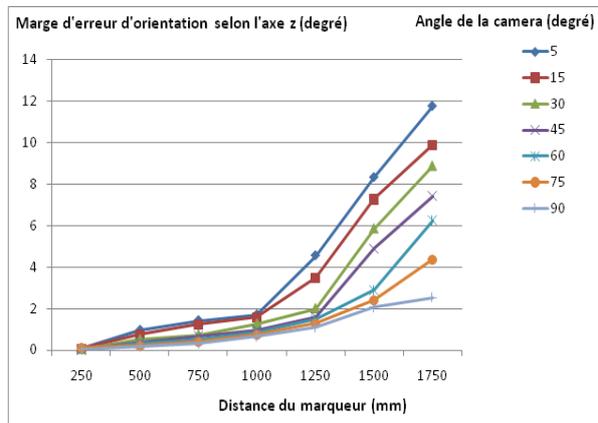


Figure 4.33 Marges des erreurs d'orientation selon l'axe Z

Les résultats montrent que les marges des erreurs de position et d'orientation sont très faibles ou presque nulles lorsque la distance "camera-marqueur" est comprise entre 250 mm et 1500 mm et l'angle de rotation Ω est d'au moins 75 degrés. Par exemple, si la distance est de 1500 mm et l'angle est de 90 degrés, la marge d'erreur de position selon l'axe Y est égal à 0,329 mm (cf. figure 4.29).

Dans le cas où l'angle de rotation est compris entre 5 et 60 degrés, les marges d'erreurs sont très faibles lorsque la distance atteint uniquement 1000 mm. Pour des distances comprises entre 1000 mm et 1500 mm, les marges d'erreurs augmentent légèrement. Pour les angles $\Omega \in [5^\circ, 60^\circ]$, la posture du marqueur capturé représente une forme inclinée difficile à détecter et à reconnaître, en particulier lorsque Ω est inférieur à 30 degrés. Comme présenté dans la figure 4.33, la marge d'erreur d'orientation selon l'axe Z atteint 2,02 degrés pour une distance "camera-marqueur" de 1250 mm, avec un angle Ω de 30 degrés.

Lorsque la distance "camera-marqueur" est supérieure à 1500 mm, les marges d'erreurs sont plus élevées. Par exemple, si la distance entre la caméra et le marqueur est de 1750 mm et l'angle de rotation est de 60 degrés, la marge d'erreur d'orientation par rapport à l'axe Z s'élève à 6,262 degrés (cf. figure 4.33). Les différentes erreurs deviennent de plus en plus importantes lorsque l'angle entre la caméra et le marqueur est inférieure à 60 degrés. Ici, le marqueur ne peut pas être détecté, puisque le taux de reconnaissance est inférieur à 0,8 (cf. figure 4.12). La figure 4.32 montre que la marge d'erreur d'orientation par rapport à l'axe Y est d'environ 11 degrés lorsque l'angle de rotation Ω est de 15 degrés et la distance "camera-marqueur" est de 1750 mm.

En outre, il a été observé à travers les tests, que les valeurs des marges des erreurs de position et d'orientation obtenues restent constantes lorsque chacun des objets virtuels insérés se trouve loin du centre du marqueur dans les intervalles [-275 mm, + 290 mm] par rapport à l'axe X, [- 420 mm, + 430 mm] par rapport à l'axe Y et [- 35 mm, + 29 mm] par rapport à l'axe Z. A l'extérieur de ces intervalles, les marges d'erreurs pour les trois axes augmentent proportionnellement avec la distance de l'objet virtuel du centre du marqueur.

Dans notre cas, nous avons tenté de réaliser l'application en travaillant à l'intérieur de ces intervalles où les marges d'erreurs selon les trois axes restent faibles. Ceci nous permet d'afficher sur l'environnement de travail du réparateur, les tâches de maintenances augmentées dans une position et une orientation correctes.

En résumé, les résultats montrent que les marges d'erreurs sont très faibles et un suivi stable est réalisé lorsque le réparateur se trouve en face du marqueur, collé sur l'équipement, à une distance maximale de 1500 mm de l'équipement. Ainsi, les modèles virtuels représentant les diagnostics et tâches de maintenance sont correctement positionnés sur l'environnement de travail du réparateur. Ceci lui permet de réaliser les différentes tâches correctement. Par contre, si l'angle de vue du réparateur, par rapport à l'axe horizontal du marqueur, est inférieur à 60 degrés, il se rapproche de l'équipement (jusqu'à une distance de 1000 mm à 1250 mm) pour obtenir un suivi stable des objets virtuels.

D'autre part, nous avons réalisé des expérimentations complémentaires pour mesurer les erreurs de position et d'orientation sur les axes X, Y et Z, et ceci, en variant la taille "d" du marqueur (Cf. Figure 4.11). Dans ces tests, la distance et l'angle de rotation entre la caméra et le marqueur considéré sont fixées respectivement à 1000 mm et 90 degrés. Nous avons utilisés pour les tests des marqueurs de différentes tailles : d = 20 mm, d = 30 mm, d = 40 mm, d = 60 mm, d = 80 mm et d = 100 mm. Les figures 4.34 et 4.35 montrent respectivement les variations des marges des erreurs de position et d'orientation.

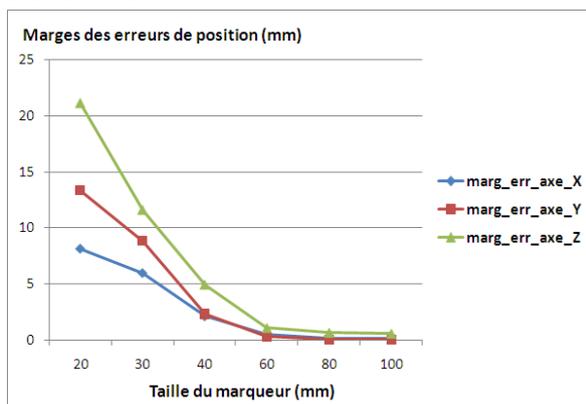


Figure 4.34 Marges des erreurs de position.

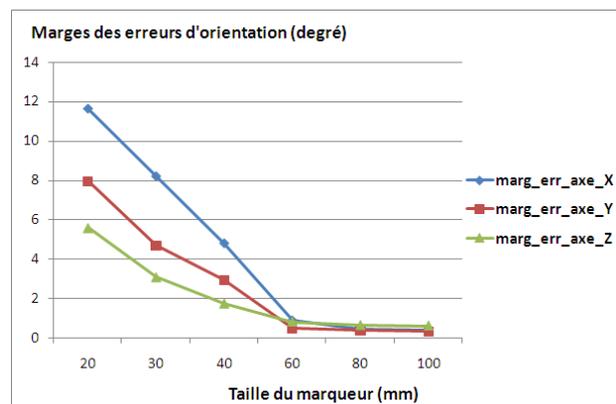


Figure 4.35 Marges des erreurs d'orientation.

Nous remarquons que ces marges d'erreurs changent avec la taille du marqueur. Ces erreurs sont faibles pour les marqueurs de grande taille ($d \geq 60$ mm). Elles augmentent de plus en plus lorsque la taille du marqueur diminue. Par exemple, pour un marqueur de taille de 100 mm, les marges des erreurs de position et d'orientation par rapport à l'axe X sont respectivement 0.146 mm et 0.412 degrés. Pour les marqueurs de petite taille ($d < 60$ mm), les marges d'erreurs augmentent. Par exemple, pour un marqueur de taille de 30 mm, les marges des erreurs de position et d'orientation par rapport à l'axe X sont respectivement 5,962 mm et 8,23 degrés.

D'après les expérimentations réalisées, la variation des marges des erreurs de position et d'orientation peut être affectée par un ensemble de paramètres qui sont: (1) la position et l'orientation de la caméra par rapport au centre du marqueur, (2) la position et l'orientation de l'objet virtuel par rapport au centre du marqueur et (3) la taille du marqueur.

Nous appelons " Δerr " la variation des marges des erreurs de position et d'orientation. L'expression de " Δerr " peut être décrite par l'équation 13 :

$$\Delta err = f(\Delta Pos(camera/marqueur), \Delta Pos(ObjVir/marqueur), \Delta Taille_marqueur) \quad (13)$$

$$\Delta err = \begin{pmatrix} \Delta err_{Tx} & \Delta err_{\theta x} \\ \Delta err_{Ty} & \Delta err_{\theta y} \\ \Delta err_{Tz} & \Delta err_{\theta z} \end{pmatrix}$$

Δerr : variation des erreurs,

$\Delta Pos(camera/marqueur)$: variation de la position/orientation de la caméra par rapport au marqueur,

$\Delta Pos(ObjVir/marqueur)$: variation de la position/orientation d'un objet virtuel par rapport au marqueur,

$\Delta Taille_marqueur$: variation de la taille du marqueur.

IV.5.2 Evaluation expérimentale des interfaces d'aide développées

Suite à la réalisation de l'application d'aide à la maintenance et en se rapportant au cycle de vie de la méthode 2TUP étendue, il convient de mener des tests afin de monter l'intérêt du système "SIT-RM" pour la maintenance industrielle. Tout d'abord, nous avons réalisés des tests unitaires et des tests d'intégration pour vérifier la précision des données fournies. Ensuite, nous avons effectués des tests sur les interfaces développées.

La partie essentielle dans la réalisation du système d'aide réside dans la présentation des données, autrement dit dans l'interface. Les tests les plus importants doivent donc concerner l'utilisabilité des interfaces interactives que nous avons développées. En effet, nous examinons l'efficacité de ces interfaces et leur acceptation par les opérateurs de maintenance. Nous étudions aussi les problèmes, s'ils existent, qui peuvent se poser dans la pratique.

Nous avons tout d'abord présenté à des utilisateurs jouant le rôle de réparateurs les solutions conçues et développées afin d'effectuer les tests. Cette étape vise à évaluer l'acceptation du système, par les utilisateurs finaux, qui représente un des critères d'utilisabilité. En outre, nous avons recueilli un nombre important de données, nécessaire pour mener des études statistiques. Le but de cette expérimentation est, aussi, d'évaluer le critère de facilité d'utilisation ("ease of use"), qui, comme le critère d'acceptation par les utilisateurs, fait partie des quatre composantes de l'utilisabilité (cf. Section 2 de l'annexe C).

Si l'objectif de cette expérimentation est d'évaluer l'impact de notre système sur le comportement de l'utilisateur, l'expérimentation doit révéler si certaines combinaisons de supports d'affichage (exemple : écran avec casque) et des représentations (exemple : procédures avec stylet 3D et menu 2D) permettent à l'utilisateur de réaliser la tâche de maintenance à moindre effort. A travers l'étude du comportement de l'utilisateur, c'est également l'analyse de la qualité de la réalisation de la tâche qui attire notre attention.

Les expérimentations se basent sur la réalisation des tâches de maintenance en utilisant plusieurs dispositifs d'affichage et plusieurs interfaces interactives. Nous présentons dans les paragraphes suivants le cadre expérimental, la méthodologie, puis les résultats obtenus suite à une analyse des données obtenues.

IV.5.2.1 Protocole expérimental

IV.5.2.1.1 Les utilisateurs du système (ou sujets)

Les utilisateurs finaux de notre système sont des techniciens et des experts en maintenance. La difficulté de trouver des techniciens issus de l'industrie, leur disponibilité réduite et les démarches administratives onéreuses pour collaborer avec des réparateurs dans une usine, ne nous permettaient pas de mener une évaluation expérimentale dans un environnement purement industriel. Nous avons donc testé notre système et ses différents modes de représentation avec des personnes qui ne sont pas forcément issus de l'industrie. Nous avons choisi des utilisateurs ayant des connaissances théoriques et pratiques dans le domaine de maintenance, mécanique et technique et qui peuvent jouer le rôle de réparateurs. Dans ce cas, nous avons mené nos expérimentations avec huit (8) sujets représentant huit (8) réparateurs avec différents niveaux d'expériences.

Les huit sujets sont de formation technique et habitués à utiliser des outils informatiques. Certains d'entre eux sont sans expérience vis-à-vis des systèmes de réalité mixte.

Enfin, le contexte dont lequel s'est déroulée notre application fait que les facteurs de stress auxquels les techniciens sont confrontés dans le milieu industriel ne pouvaient pas être reconstitués dans nos expérimentations.

IV.5.2.1.2 Tâches expérimentales

Au cours de nos expérimentations, l'activité confiée à nos sujets consiste à réaliser des tâches de maintenance en utilisant les différentes interfaces développées dans le système "SIT-RM". Les sujets doivent avoir des informations sur la panne pour ensuite enclencher le processus de réparation. Les tâches de maintenance consistent à entretenir, réparer ou modifier des composants d'un équipement en panne et ceci en utilisant des outils appropriés tels que les pinces, clés plates, tourne-vis, etc.

Dans cette évaluation, des procédures de maintenance ont été implémentées pour être appliquées sur les équipements suivants : générateur photovoltaïque du système de pompage PV et moteur de voiture Peugeot 206 (cf. Tableau 4.4).

Tableau 4.4. Equipements utilisés dans les tests

<i>Equipement</i>	<i>Panne/défaillance</i>	<i>Diagnostic</i>	<i>Tâche de maintenance</i>
Moteur Peugeot 206	Moteur ne démarre pas.	Bougies défectueuses.	Remplacer les bougies.
	Volant du conducteur.	Difficulté à tourner le volant.	Vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.
Générateur photovoltaïque	Alimentation faible.	Manque d'électricité.	1. Vérifier si un ou plusieurs câbles sont déconnectés. 2. Nettoyer le panneau solaire.

En effet, chacun des sujets se place en face de l'équipement à réparer muni d'un dispositif mobile équipé d'une caméra. Il sélectionne le type de panne qui figure dans la liste de pannes affichée sur l'interface. Un diagnostic de l'équipement est proposé au sujet. Une fois la rubrique diagnostic est sélectionnée, une procédure de maintenance augmentée s'affiche sur le flux vidéo filmant la scène. L'affichage de cette procédure s'effectue en plusieurs étapes. Chaque étape affiche une seule tâche de maintenance à la fois. Cette tâche est directement recalée sur le lieu où le sujet doit intervenir pour réparer l'équipement. Une fois la tâche réalisée, le réparateur affiche la tâche suivante. Une fois la procédure réalisée, le sujet quitte l'application. Un rapport d'intervention est ensuite généré. Le réparateur en question peut compléter ce rapport en cas de besoin.

IV.5.2.1.3 Dispositifs techniques

Durant les expérimentations, les sujets utilisent des dispositifs mis en jeu pour le fonctionnement de la plateforme de maintenance "ARIMA" décrite dans la section IV.2. Durant l'évaluation, nous nous sommes focalisés sur les dispositifs mobiles munis de caméra pour la portabilité dans le lieu de travail. Les dispositifs attribués aux différents sujets sont :

- 1- Dispositif mobile de type tablette : MSI WindPad 110W ;
- 2- Dispositif mobile de type smartphone : Samsung Galaxy S1;
- 3- Dispositif mobile de type casque de visualisation : HMD vidéo Wrap 920AR connecté à la Tablette MSI WindPad 110W.

Les autres dispositifs mis en jeu dans le fonctionnement de la plateforme ARIMA et utilisés dans nos expérimentations ne sont pas considérés dans l'évaluation. Ces dispositifs sont :

- 1- Serveur web ;
- 2- Serveur de base de données ;
- 3- Table interactive ;
- 4- Téléphone mobile ;
- 5- Pc de bureau.

IV.5.2.1.4 Déroulement des évaluations et analyse des résultats

Dans notre cas, nous avons procédé à deux types d'analyse : l'analyse objective qui mesure les performances des tâches à réaliser et l'analyse subjective qui se base sur la mesure de la satisfaction de l'utilisateur.

L'analyse objective, appelée également analyse quantitative, est basée sur des données collectées à partir des résultats des tests d'application. L'évaluation quantitative de données a été mesurée empiriquement, et ceci, en considérant trois principaux critères: le temps d'exécution des tâches (t_{total}), le taux de réussite ($taux_r$) et la difficulté pour réaliser une tâche ($diff_{t\grave{a}che}$). Pour les trois critères, nous avons mesuré la valeur moyenne des huit sujets.

L'analyse subjective consiste à mesurer les performances des utilisateurs et à évaluer leur appréciation globale sur les expérimentations effectuées. Nous nous sommes essentiellement basés dans cette analyse sur l'étude de la facilité d'utilisation, la vitesse et la précision du système interactif proposé. En outre, nous avons évalué les préférences et le degré de satisfaction des utilisateurs afin d'avoir un retour qualitatif de l'expérience. Un questionnaire a été utilisé pour mesurer ces différents paramètres (cf. Tableau 4.5). Les données recueillies à partir du questionnaire ont été évaluées en se basant sur une analyse empirique.

(a) Analyse objective

Nous avons effectué des expérimentations avec les huit participants visant à réaliser des tâches de maintenance. Durant ces tests, nous avons mesuré le temps " t_{total} " pendant lequel les participants réalisent ces tâches de maintenance. Nous avons pris comme exemple d'équipements à maintenir, le système de pompage et le moteur de Peugeot 206. Les figures 4.36 et 4.37 illustrent les résultats de ces expérimentations.

Notons que l'expression de " t_{total} " peut être écrite de la manière suivante :

$$t_{total} = t_{application} + t_{t\grave{a}che} \quad (14)$$

Avec :

$t_{application}$: temps correspondant à la manipulation de l'application ;

$t_{t\grave{a}che}$: temps nécessaire pour réaliser la tâche.

A travers la figure 4.36, nous avons remarqué que le temps moyen pour réaliser la tâche "vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée", en utilisant le smartphone Samsung Galaxy S1, est d'environ $t_{total} = 63$ secondes, avec: $t_{application} = 41$ secondes et $t_{t\grave{a}che} = 22$ secondes.

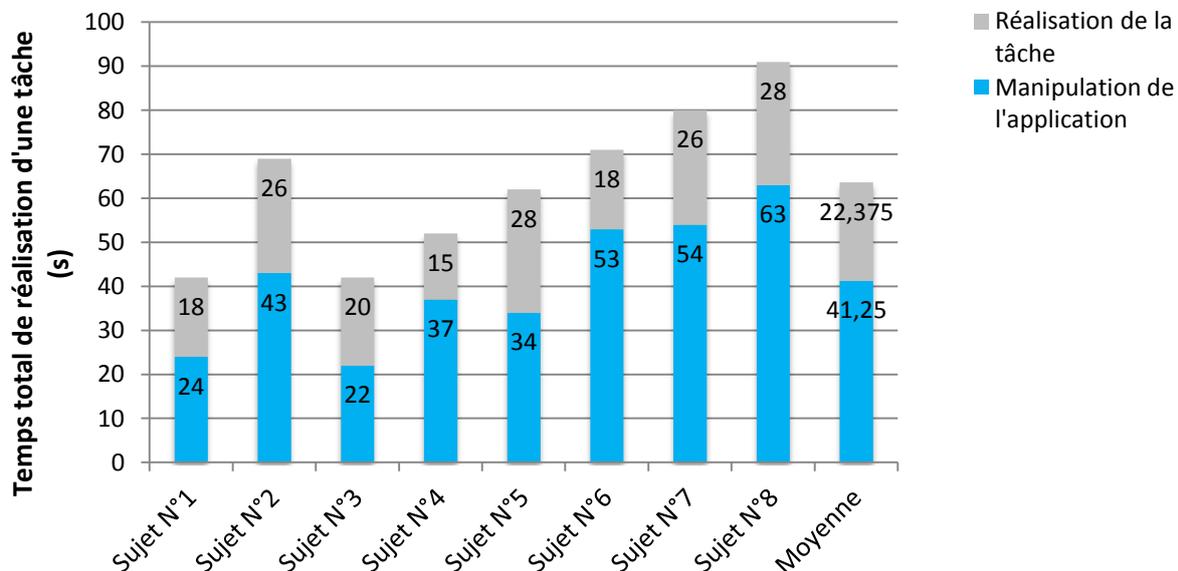


Figure 4.36 Temps de réalisation de la tâche de maintenance: vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée.

Nous avons observé que quatre (4) sujets (sujets N°1, 3, 4 et 5)* ont utilisé l'application pendant une durée inférieure à 41 secondes. En effet, ces sujets se sont vite familiarisés avec l'interface. Ils n'ont pas rencontré de difficultés et ils n'ont pas commis des erreurs de manipulation. Certains de ces sujets ont déjà travaillé sur des applications similaires et connaissent bien les objectifs attendus de l'application pour l'aide à la maintenance. A l'inverse, la durée de manipulation des fonctionnalités de l'interface est supérieure à la moyenne pour les sujets N°2, 6, 7 et 8. Ces sujets ont pris plus de temps pour arriver à visualiser et manipuler correctement les objets virtuels. Ces sujets ont rencontré des difficultés. Ils ont commis des erreurs et des allers-retours durant la manipulation de l'application.

D'autre part, nous avons observé que la durée de réalisation de la tâche de maintenance pour les huit (8) sujets est variable (variation entre 15s et 28s). Cette variation est justifiée par le fait que certains

* sujet N°i : sujet numéro "i" avec i allant de 1 à 8.

sujets (sujets N°1, 3, 4 et 6) possèdent plus d'expériences dans la réparation des voitures que d'autres (sujets N° 2, 5, 7 et 8).

Au final, les sujets estiment que l'application a contribué à la diminution des erreurs de réparation et à la réduction du temps de complétion des tâches de maintenance. Certains sujets notent que le temps consacré à la réalisation des tâches peut être sensiblement réduit (jusqu'à 1/3 du $t_{total} = 63$ secondes), lorsque le système "SIT-RM" est utilisé à plusieurs reprises. Le sujet N°4 note aussi que le temps moyen pour réparer l'équipement (MTTR) peut être réduit sensiblement. Il constate, par conséquent, que l'indice de maintenabilité et le taux de disponibilité peuvent être sensiblement améliorés.

$$\text{Indice de maintenabilité} = \frac{1}{MTTR} \quad (15)$$

$$\text{Taux de disponibilité} = \frac{MTBF}{MTTR+MTBF} \quad (16)$$

Avec :

MTTR (Mean Time to Repair) représente le temps moyen pour réparer.

MTBF (Moyenne des Temps de Bon Fonctionnement) représente le temps moyen entre pannes.

Comme décrit, aussi, la figure 4.37, le temps moyen pour réaliser successivement les tâches de maintenance "vérifier si un ou plusieurs câbles sont déconnectés (tâche N°1)" et "nettoyer le panneau solaire (tâche N°2)", en utilisant la tablette MSI WindPad 110W, est donné comme suit:

$$t_{total_t\grave{a}che\ 1} (t_{application} + t_{t\grave{a}che\ 1}) = 70,5s (t_{application} = 43,5 \text{ et } t_{t\grave{a}che\ 1} = 27).$$

$$t_{total_t\grave{a}che\ 2} (t_{application} + t_{t\grave{a}che\ 2}) = 29s (t_{application} = 17 \text{ et } t_{t\grave{a}che\ 2} = 12).$$

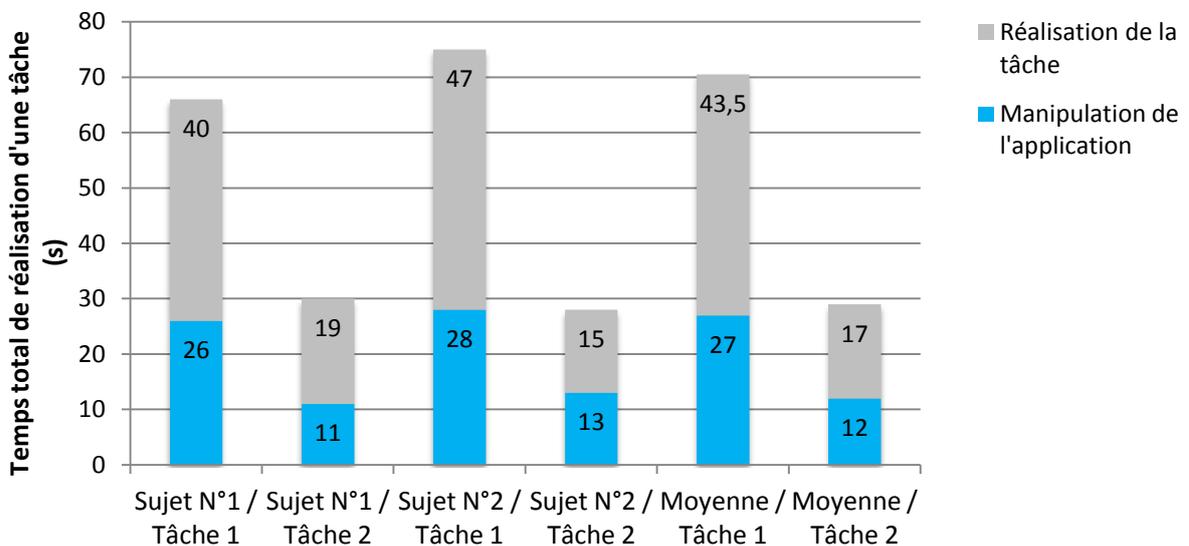


Figure 4.37 Temps de réalisation des tâches de maintenance "vérifier si un ou plusieurs câbles sont déconnectés (tâche N°1)" et "nettoyer le panneau solaire (tâche N°2)".

Nous avons observé que le sujet N°1 arrive à vérifier l'état des câbles plus rapidement que le sujet N°2 tandis qu'ils manipulent l'application pendant pratiquement la même durée (26s pour le sujet N°1 et 28s pour le sujet N°2). En outre, nous avons constaté que la durée de réalisation de la tâche "nettoyer le panneau solaire" pour les deux sujets varie légèrement, c'est-à-dire, 15s pour le sujet N°1 et 19s pour le sujet N°2. Les deux sujets jugent que cette tâche est facile à réaliser.

Les sujets estiment que l'interface offre des informations pertinentes concernant la tâche à réaliser et les outils à utiliser. Les deux sujets jugent que ces tâches, telles qu'elles sont représentées, sont claires et compréhensibles. Ils notent aussi que la quantité d'informations affichées est répartie d'une façon cohérente au niveau de l'interface. Le sujet N°2 mentionne, en outre, que le taux de disponibilité du générateur photovoltaïque peut être considérablement amélioré.

Toutefois, les sujets soulèvent un certain nombre de remarques à prendre en considération dans le système "SIT-RM" afin de surmonter certaines lacunes constatées lors de l'expérimentation. A titre d'exemple, le sujet N°2 propose d'attribuer des animations aux objets 3D afin de mieux expliquer le déroulement des tâches de maintenance.

D'autre part, nous avons réalisé des analyses empiriques pour expérimenter l'évolution des activités de maintenance selon les cinq modalités suivantes :

- « sans. doc » : réaliser la tâche sans aucune documentation.
- « doc. papier » : réaliser la tâche avec la documentation.
- « IHM » : réaliser la tâche en utilisant une interface classique.
- « SIT_RM_smart_phone » : réaliser la tâche en utilisant le système "SIT-RM" avec le smartphone.
- «SIT_RM_casque_HMD » : réaliser la tâche en utilisant le système "SIT-RM" avec le casque HMD vidéo.

Dans cette analyse, nous observons l'influence de ces modalités sur les variables liées à la réalisation d'une tâche de maintenance. Ces variables sont taux_r et $\text{diff}_{\text{t\^a}che}$. Nous nous sommes basés sur une évaluation empirique pour déterminer l'impact de ces modalités sur ces deux variables. En perspective, nous envisageons d'effectuer une étude approfondie pour déterminer l'impact de ces modalités en utilisant des méthodes formelles (méthodes statistiques, etc.) et de comparer les résultats obtenus avec ceux analysés empiriquement.

Dans le cadre de l'assistance à la maintenance, notre analyse doit répondre à une question principale : le système d'aide "SIT-RM" apporte-t-il un gain au réparateur durant l'intervention par rapport aux systèmes d'aide classiques ?

A l'issue de l'expérimentation, nous avons demandé aux huit (8) participants d'évaluer le taux de réussite (taux_r) et la difficulté ($\text{diff}_{\text{t\^a}che}$) pour réaliser une tâche de maintenance. Le taux de réussite calculé est une moyenne des taux de réussite des huit sujets. Les résultats sont illustrés sur la figure 4.38 et la figure 4.39 ci-dessous.

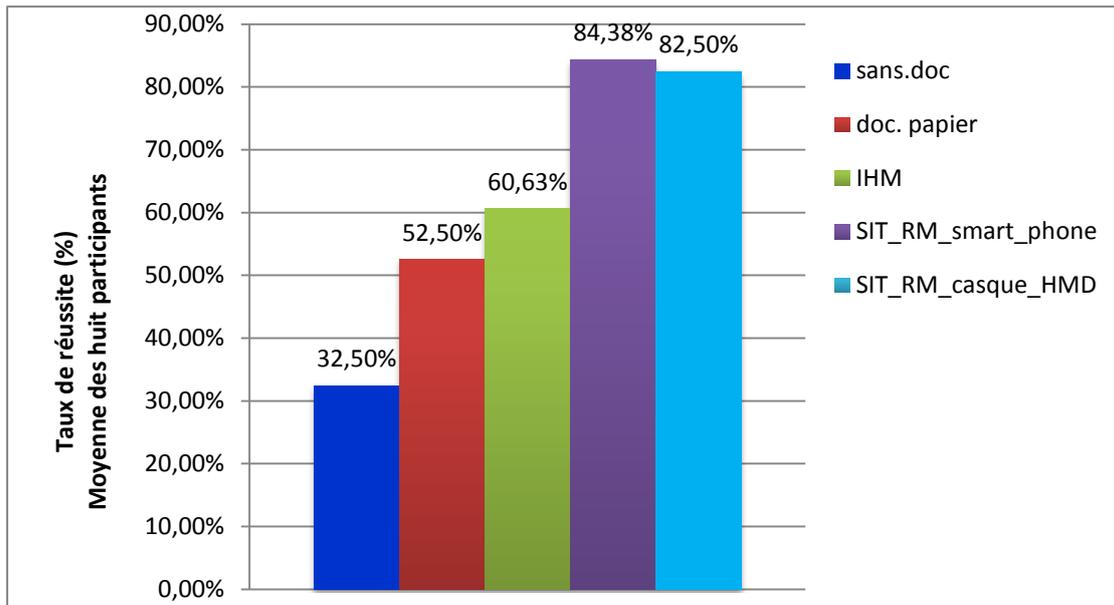


Figure 4.38 Taux moyen de réussite d'une tâche de maintenance.

D'un point de vue global, la figure 4.38 montre qu'il y a une différence significative entre les cinq facteurs concernant le taux de réussite d'une tâche de maintenance. Nous citons par exemple que la moyenne du taux de réussite en utilisant un smartphone est de 84,375% contre uniquement 32,5% pour la modalité « sans documentation ».

Ainsi, le taux de réussite, selon les huit sujets, est très faible (taux de réussite moyen = 32,50%) lorsque l'opérateur réalise une tâche de maintenance sans documentation. En utilisant les documents papiers, le taux de réussite atteint les 52%. Ce taux confirme que la documentation n'assure pas toujours la réussite de la tâche (cf. Section I.5.1 du chapitre 1). L'utilisation d'une interface classique IHM augmente légèrement le taux de réussite (taux de réussite moyen = 60,625%) mais il reste insuffisant. Ceci est confirmé par les participants qui estiment qu'il n'y a pas de large différence entre une interface classique et l'utilisation de la documentation papier.

Le taux de réussite atteint des niveaux satisfaisants lorsque les opérateurs utilisent le système "SIT-RM" avec un smartphone (taux de réussite moyen = 84,375%) ou avec un casque HMD (taux de réussite moyen = 82,50%).

D'un point de vue quantitatif, c'est avec l'utilisation du système "SIT-RM" que nous constatons le taux de réussite le plus élevé et, comme nous nous attendions, c'est avec la modalité « sans.doc » que le taux est le plus faible (cf. Figure 4.38). Ce gain est dû au fait que la réalité mixte a permis de compenser le manque de précision de certaines consignes en localisant de façon précise les actions à réaliser sur l'équipement réel. Ceci est également confirmé par le fait que nous ne constatons pas de différence significative entre les modalités « doc. papier » et « IHM ». Ce n'est donc pas le fait de passer d'un support papier à une application informatique qui améliore le taux de réussite dans la réalisation des tâches, mais bien l'apport des augmentations 2D/3D et des interactions 3D ou tactiles.

Les résultats obtenus ci-dessus sont également confirmés par l'évaluation représentée par la figure 4.39. Cette dernière illustre bien la diminution de la difficulté $diff_{t\grave{a}che}$ pour la réalisation d'une tâche de maintenance avec l'utilisation du système SIT-RM.

En effet, les sujets pensent que la réalisation d'une tâche de maintenance sans documentation est difficile (deux sujets) voire très difficile (cinq sujets). Les sujets estiment que l'utilisation de la documentation rend la tâche plus ou moins difficile : difficile (deux sujets), moyen (quatre sujets), facile (deux sujets). Six sujets pensent que l'utilisation d'interfaces classiques facilite légèrement la réalisation de la tâche : moyen (six sujets), facile (deux sujets). La réalisation de la tâche de maintenance est jugée facile (cinq sujets) voire très facile (trois sujets) lorsque nous utilisons le système SIT-RM.

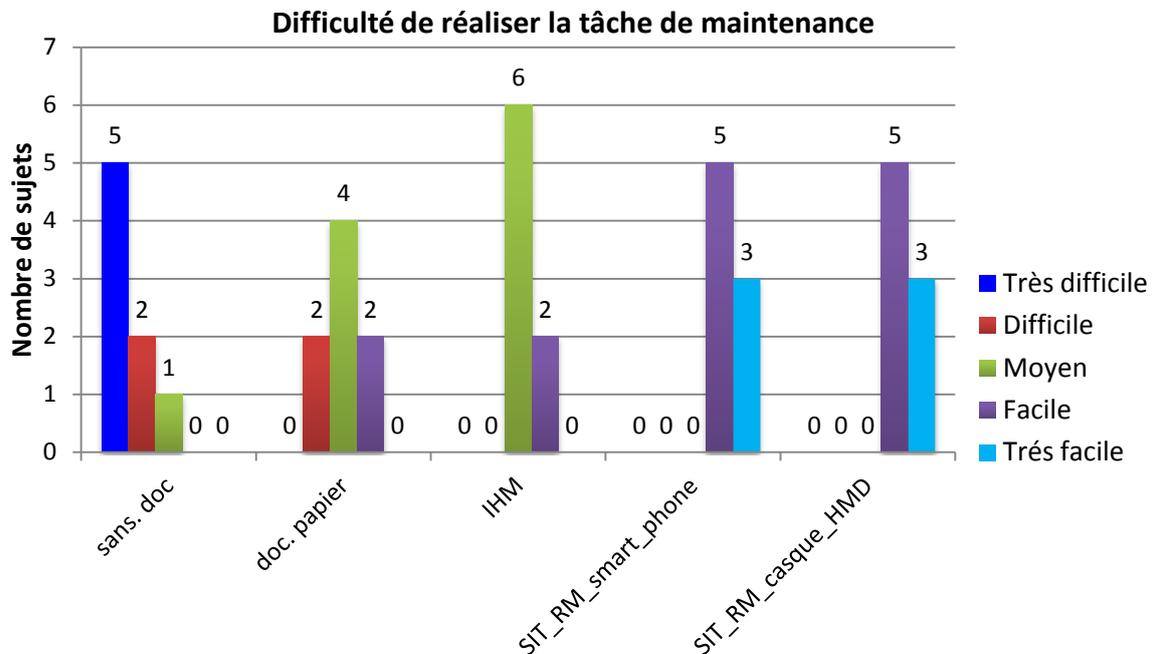


Figure 4.39 Avis des participants sur la difficulté de réaliser une tâche de maintenance.

Enfin, en ce qui concerne l'utilisation de l'application informatique inhérente à la réalité mixte, aucun sujet n'a montré de difficultés particulières. Ce résultat n'est pas étonnant du fait des compétences similaires des différents participants dans l'utilisation de matériels informatiques.

En conséquence, ces tests semblent confirmer l'hypothèse avancée dans la littérature sur l'intérêt de la réalité mixte et des technologies émergentes, à savoir une diminution sensible du nombre d'erreurs dans la réalisation des tâches. Néanmoins, comme tout autre support d'information, la réalité mixte ne remplace pas totalement l'assistance humaine. Nous retrouvons cette interrogation dans plusieurs études sur l'utilisation des NTIC [47]. De plus, les résultats obtenus ne nous permettent pas de conclure définitivement sur l'efficacité du système interactif tangible de réalité mixte proposé. Nous avons constaté que l'application doit être testée sur un large échantillon de participants. D'autre part, nous nous sommes rendus compte que la robustesse de ces applications doit être améliorée à l'égard des conditions liées aux opérateurs (niveau de connaissance et de compétence) et à l'environnement de réparation, car, selon Anastassova [5] une application de réalité mixte peu robuste peut conduire à des résultats contradictoires.

(b) Analyse subjective

Pour commencer les tests, nous avons expliqué aux sujets ce qui leur est demandé. Nous leurs avons décrit le système développé, le déroulement de l'expérimentation et les différents essais. Les sujets se sont ensuite entraînés à utiliser les différentes interfaces et à effectuer des opérations dans l'environnement de test. Après cela, les participants ont commencé l'étude. Une fois les tests pratiques sont achevés, les huit (8) sujets ont rempli un questionnaire : celui-ci se compose de 16 questions. Les sujets répondent à chaque question avec une échelle de 1 à 5 (5: totalement d'accord, 4: d'accord, 3: moyen, 2: légèrement en désaccord, 1: complètement en désaccord). Un champ « description » est mis à la disposition des participants leur permettant de donner des commentaires à l'issue de l'évaluation. Nous avons retenu les tâches de maintenance « remplacer les bougies » et « vérifier le niveau d'huile dans la boîte de la direction assistée » pour permettre aux sujets de répondre au questionnaire. Le tableau 4.5 montre le résultat du questionnaire (les sujets ont utilisé le smartphone Samsung Galaxy S1 comme support mobile).

Selon le tableau 4.5, tous les sujets estiment que la taille des objets 3D leur permet de visualiser clairement le contenu d'une tâche de maintenance à réaliser (8/8 sujets sont satisfaits, cf. Question 2). La plupart d'entre eux (7/8 sujets) jugent que ces tâches, telles que sont représentées, sont claires et compréhensibles (cf. Question 4). Dans le même contexte, nous avons constaté que les informations affichées sur l'interface sont réparties d'une façon cohérente (6/8 sujets sont satisfaits, cf. Question 10). Les sujets notent que l'interface contient les informations nécessaires et suffisantes à leur travail. Concernant l'utilisation du dispositif mobile, la majorité des sujets sont satisfaits à l'égard de sa taille et de son poids (cf. Question 5 et 6) et souhaitent utiliser ce dispositif pour d'autres applications de maintenance.

Six (6) sujets préfèrent l'utilisation des écrans tactiles pour réaliser leur tâche et souhaitent remplacer les dispositifs traditionnels tels que la souris et le clavier (cf. Question 8). Cependant, un (1) sujet (sujet N°6) préfère les dispositifs classiques puisqu'ils lui offrent plus de facilité, selon lui, dans la manipulation de l'interface (cf. Question 8).

Nous avons, en outre, constaté que quatre (4) des huit (8) sujets demandent plus de temps pour se familiariser avec la manipulation des objets 2D/3D (cf. Question 7). Aussi ils estiment que la perception et la manipulation de ces objets dans l'environnement réel reste difficile à maîtriser, puisqu'elles demandent de changer certaines de leurs habitudes par rapport à l'utilisation des dispositifs classiques.

D'autre part, 6/8 sujets sont satisfaits concernant la réponse du système de suivi/recalage implémenté. Ils observent que le suivi des objets virtuels est garanti même s'ils changent de position (cf. Question 11). Néanmoins, un sujet (sujet N°1) note que le suivi est parfois lourd et conduit à des erreurs de positionnement des objets virtuels (cf. Question 11). Il cite le problème de changement de luminosité qui peut conduire à la variation de la matrice de transformation (camera-marqueur) et par conséquent à des erreurs de positionnement et de suivi des objets virtuels.

Tableau 4.5. Questionnaire adressé aux différents sujets

N°	Question	Avis des sujets								Moyenne
		Sujet N°1	Sujet N°2	Sujet N°3	Sujet N°4	Sujet N°5	Sujet N°6	Sujet N°7	Sujet N°8	
1	La taille du texte 2D est adéquate.	4	5	3	4	4	5	4	4	4,125 7/8 satisfaits
2	La taille des flèches 3D est adéquate.	5	5	4	4	4	4	5	5	4,5 8/8 satisfaits
3	La Taille de l'affichage est suffisante.	3	3	5	4	4	3	4	4	3,75 5/8 satisfaits
4	Les tâches de maintenance "augmentées" sont compréhensibles.	4	5	4	4	4	3	5	5	4,25 7/8 satisfaits
5	La taille du dispositif est adéquate.	4	4	4	4	4	4	5	3	4 7/8 satisfaits
6	Le poids du dispositif est approprié.	3	5	4	4	4	4	5	4	4,125 7/8 satisfaits
7	Il est facile de manipuler les objets 2D/3D (rotation, translation et mise à l'échelle).	3	5	4,5	3	3	4	4	3	3,6875 4/8 satisfaits
8	L'utilisation d'un écran tactile est meilleure que la souris et le clavier.	5	4	3	4	4	2	5	4	3,875 6/8 satisfaits
9	L'utilisation d'une indication sonore est pertinente.	5	4	4	5	4	3	4	5	4,125 7/8 satisfaits
10	La quantité d'informations affichées sur l'écran est adéquate. (interface non surchargée)	3	5	3,5	4	4	4	5	4	4,0625 6/8 satisfaits
11	La réponse du système interactif est rapide (suivi et affichage des objets virtuels).	2	5	4,5	4	4	3	4	4	3,8125 6/8 satisfaits
12	Le système interactif est utile pour localiser la tâche de maintenance.	5	5	4,5	5	4	3	4	5	4,4375 7/8 satisfaits
13	Le système interactif est utile pour réaliser des tâches de maintenance.	4	5	4	5	4	3	5	4	4,25 7/8 satisfaits
14	Le système interactif est confortable pour son utilisation.	4	5	4	4	4	4	5	4	4,25 8/8 satisfaits
15	L'interface est facile à utiliser.	4	5	4,5	4	4	4	5	5	4,4375 8/8 satisfaits
16	L'application permet d'atteindre les objectifs requis.	5	4	4,5	4	4	4	4	5	4,3125 8/8 satisfaits

D'une manière globale, les participants estiment que le système interactif proposé est facile à utiliser (cf. Questions 14 et 15). La plupart d'entre eux souhaitent vivement l'utiliser pour localiser et réaliser une tâche de maintenance (cf. Questions 12 et 13). Ils jugent que la tâche de maintenance peut être réalisée avec un moindre effort. Ils concluent aussi que l'application leur permet d'atteindre les objectifs requis. Toutefois, les sujets proposent des améliorations à apporter au système proposé. A titre d'exemple, le sujet N°2 propose d'attribuer des animations aux objets 2D/3D afin de mieux expliquer le déroulement de la tâche de maintenance. Le sujet N°4 propose d'établir une documentation de l'application et/ou un outil d'apprentissage afin d'expliquer certaines notions de la réalité mixte, l'objectif de l'application accompagné d'une phase de test.

IV.6 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons proposé le système "SIT-RM" et implémenté par la suite des prototypes d'interfaces interactives pour l'aide à la maintenance et ceci après avoir appliqué la méthode 2TUP étendue. Ces prototypes ont été implémentés dans divers dispositifs : Pc-portable, tablette-Pc, smartphone, casque de visualisation HMD et table interactive. Le système SIT-RM a été intégré dans la plateforme de maintenance distribuée ARIMA permettant à des acteurs (techniciens ou expert en maintenance) munis de ces dispositifs de coopérer en partageant un espace visuel augmenté et interactif.

Dans la deuxième partie du chapitre, une évaluation expérimentale du système de réalité mixte et des prototypes proposés a été réalisée. En effet, nous avons mené deux expérimentations. Pour la première, nous avons évalué l'efficacité du module de suivi de la librairie i-ARToolkit proposée. Dans ce cas, l'expérimentation a montré des résultats encourageants. Néanmoins, des lacunes restent à surmonter. Il s'agit d'améliorer la reconnaissance des marqueurs et la stabilité des objets virtuels en établissant une relation entre l'ensemble des marqueurs de la scène et la distance entre la caméra et les marqueurs. Cette approche augmentera le taux de reconnaissance des marqueurs et réduira d'avantage l'instabilité des objets virtuels.

La deuxième expérimentation a été réalisée pour valider les propriétés ergonomiques des prototypes d'interfaces proposés. Essentiellement, nous avons évalué, la facilité d'utilisation de ces interfaces et leur acceptation par les utilisateurs (réparateurs). À travers des tests utilisateurs, les réparateurs ont exprimé leur intérêt à utiliser le système proposé pour réaliser les tâches de maintenance. Ils estiment que ce système leur permet de réduire le temps d'intervention et d'éviter les erreurs de réparation. D'autre part, les réparateurs novices trouvent que ce système peut être un moyen de formation et d'apprentissage.

Nous avons constaté qu'employer le système interactif pouvait faire gagner plus de 20% de temps dans la réussite d'une tâche de maintenance. En plus, les erreurs commises par les réparateurs sont sensiblement réduites lorsque la perception de l'opérateur de la scène réelle est enrichie.

La plupart des sujets impliqués dans les tests confirment que le passage des modalités classiques tels que la souris et le clavier vers les écrans tactiles et l'interaction 3D améliore les performances de manipulation des objets numériques, offre une interaction intuitive et une meilleure perception visuelle des objets virtuels.

Toutefois, les sujets recommandent d'améliorer le système proposé en éliminant certaines anomalies et imprécisions (instabilité des objets virtuels, erreur de positionnement, etc.) et d'ajouter certaines informations nécessaires au processus de réparation.

Enfin, nous devons poursuivre nos expérimentations sur un échantillon plus important d'utilisateurs pour que les résultats soient significatifs.

Conclusion générale

Rappel du contexte

L'assistance à la maintenance, qu'elle soit basée sur l'homme ou sous forme d'un support formalisé constitue une démarche nécessaire pour améliorer la productivité de l'entreprise. Aujourd'hui, nous assistons à plusieurs contraintes auxquelles les réparateurs doivent faire face tels que : gammes de production de plus en plus rapide, multiplicité des procédures, manque de visibilité du système à maintenir et incertitude des opérations à réaliser. En plus, nous observons la réduction de la durée des formations en laissant le soin aux techniciens de se former individuellement et de réaliser des efforts supplémentaires d'apprentissage et d'acquisition de connaissances. Le réparateur est ainsi confronté à des difficultés lui entraînant une perte de temps considérable et un coût de maintenance élevé sans oublier le risque d'erreurs et d'accident auquel il est exposé.

Avec l'évolution de la technologie, les industriels se sont orientés vers de nouveaux outils d'assistance, de la documentation papier en passant par le téléphone jusqu'aux systèmes informatiques. L'évolution rapide des NTIC et l'apparition de nouveaux paradigmes d'interaction tels que la réalité mixte et les systèmes interactifs ont changé complètement la relation entre l'homme et les outils d'aide qu'il manipule. Ceci entraîne un mode de travail des individus complètement différent. A travers ce constat, nous nous sommes intéressés à explorer la possibilité d'intégrer les nouveaux paradigmes d'interactions et les NTIC dans une solution d'aide à la maintenance et à étudier les performances qu'apportent les outils d'aide résultants dans l'activité de maintenance dans un contexte industriel.

La contribution de cette thèse est basée essentiellement sur deux grands volets. Le premier volet consiste à proposer une méthodologie de développement des systèmes interactifs pour l'aide à la maintenance basée sur le paradigme de la réalité mixte. Dans ce contexte, nous proposons une approche permettant d'intégrer les systèmes interactifs que nous développons dans le processus de gestion de maintenance de l'entreprise en considérant les besoins des opérateurs. Le deuxième volet concerne la réalisation de ces systèmes pour supporter les activités de maintenance dans un contexte industriel. Cette contribution nous a permis de développer des interfaces d'aide multimodales et mobiles permettant de mettre en commun d'une façon harmonieuse des informations nécessaires à la réparation, issues du monde réel et du monde virtuel, dans une vue unique. Ces interfaces offrent une configuration immersive permettant aux opérateurs de visualiser et de manipuler des données durant l'intervention.

Synthèse du document

Nous avons, tout d'abord, passé en revue les différents principes et fondements technologiques des systèmes interactifs mixtes, ainsi que les systèmes d'aide développés (cf. Chapitre1). Pour chacun de ces principes, nous avons tracé leur évolution et ensuite nous avons représenté leur fondement

technologique. L'objectif est de voir les possibilités qui nous sont offertes pour la conception de notre propre système d'aide à la maintenance. Un intérêt a été accordé aux aspects d'interaction utilisateur-machine (multi-modalité, interaction 2D/3D, etc.). Pour le deuxième chapitre de cette thèse, nous avons effectué une étude des différentes méthodes de développement des systèmes interactifs mixtes. Nous avons, ensuite, mené une analyse comparative de ces méthodes de développement. Cette analyse nous a permis d'identifier les apports et les limites de chaque méthode proposée dans la littérature. Nous avons, ainsi, tiré profit de ces apports afin de proposer, dans le troisième chapitre, notre méthodologie de développement de systèmes interactifs mixtes pour l'aide à la maintenance. Ce système peut être intégré dans le système d'information de l'entreprise. Cette intégration constitue un défi majeur du point de vue ergonomique que nous avons surmonté à travers nos contributions. Enfin, nous avons présenté, dans le quatrième chapitre, le volet pratique de notre travail. Tout d'abord, nous avons réalisé le système interactif tangible d'aide "SIT-RM". Ce système a été intégré dans une plateforme distribuée et coopérative d'e-maintenance "ARIMA" développée dans notre laboratoire. L'objectif est de proposer une solution de maintenance coopérative basée sur la réalité mixte. Le système "SIT-RM" a été utilisé, par la suite, pour réaliser des tâches de maintenance sur le système de pompage photovoltaïque et sur des moteurs de voiture. A l'issue de ces expérimentations, nous avons testé et évalué, à travers un échantillon d'utilisateurs, l'influence des interfaces interactives sur les performances des réparateurs durant l'activité de maintenance. En effet, les sujets impliqués dans l'évaluation estiment que les indicateurs de maintenance peuvent être améliorés à l'image de l'indice de maintenabilité et du taux de disponibilité.

Résumés de nos contributions et résultats

Cette thèse pluridisciplinaire apporte plusieurs contributions aux recherches en Interaction Homme-Machine, en réalité mixte et en maintenance industrielle.

En Interaction Homme-Machine (IHM), nous avons proposé une méthodologie de conception permettant d'intégrer les propriétés des interactions de réalité mixte sous la forme de besoins d'interaction et d'objets d'interaction. Nous avons proposé des solutions conceptuelles en termes de processus, langages, modèles et outils afin d'intégrer les pratiques et modèles de l'interaction homme-machine durant l'évolution de la méthode de développement. Des modèles et approches ont été développés pour formaliser les relations entre l'espace fonctionnel et l'espace d'interaction. En outre, une démarche pour décrire le processus de collaboration entre des acteurs (concepteurs et spécialistes) issus de cultures informatiques différentes a été en outre intégrée dans la méthode. Nous proposons aussi, un processus, afin de gérer l'évolution de l'espace métier lors de l'intégration de besoins d'interaction. Afin de fournir une interface utilisable pour les opérateurs industrielle, nous avons considéré les préoccupations et les attentes des utilisateurs en introduisant dans notre méthodologie la démarche de conception centrée usage.

En réalité mixte, nous avons proposé un système interactif tangible "SIT-RM" où deux modules ont été développés. Le module de suivi/recalage "i-ARToolkit" qui garantit un suivi cohérent des objets virtuels par rapport au flux vidéo de la scène réelle visualisé par le réparateur. Le module d'interaction 2D/3D, basé sur les propriétés de i-ARToolkit, permet à l'utilisateur d'interagir, en utilisant un stylet virtuel 3D, avec les modèles 2D/3D de la scène réelle. Cette forme d'interaction permet à l'utilisateur de percevoir le contact qu'il effectue avec des objets purement virtuels.

En maintenance industrielle, nous avons enrichi la plateforme ARIMA par l'intégration du composant "SIT-RM" (Système Interactif Tangible de Réalité Mixte). A travers ce système, nous avons proposé plusieurs interfaces interactives implémentées sur plusieurs dispositifs mobiles tels que les Pc-portables, les tablettes- Pc, les smartphones et les casques de visualisation HMD. Le réparateur peut utiliser ces dispositifs pour visualiser le diagnostic et les tâches de maintenance en 3D. Il peut aussi interagir avec un menu mixte 2D/3D afin d'ajouter, modifier ou supprimer des objets virtuels (pièces 3D, outils 3D, etc.) ou de contrôler leurs propriétés (translation, rotation, animation, etc.). Enfin, nous nous sommes basés sur le composant "SIT-RM" pour intégrer dans la plateforme ARIMA une solution de maintenance coopérative permettant aux réparateurs (techniciens et experts) d'échanger et de partager des informations sous formes de représentations 2D/3D ou via un canal vocal, en plus de la messagerie et le chat déjà implémentés.

Perspectives

Les perspectives de nos contributions s'étendent sur deux grands volets :

Pour le premier volet, nos perspectives concernent la méthodologie proposée. L'évolution et l'enrichissement de la méthode 2TUP étendue sont envisagés. Tout d'abord, nous poursuivons la modélisation de l'interaction 3D déjà entamé dans cette thèse dans le but de l'étendre au cas de l'interaction 3D collaborative. Aussi, nous envisageons de proposer des modèles afin de consolider la cohérence entre les modèles et langages des pratiques de GL et IHM. De plus, nous nous intéressons à l'instrumentation de la méthode, en particulier, fournir un outil d'aide pour décrire l'organisation des tâches, des activités, des modèles et des codes dans le processus de développement. L'intérêt est de tracer à la fois l'évolution des produits de chaque phase et l'activité de collaboration entre les spécialistes GL et IHM.

En outre, l'évaluation de la méthode de développement sera étendue sur un large échantillon d'utilisateurs afin d'obtenir des résultats plus significatifs et ainsi permettre aux équipes de développement industriels d'adopter notre méthodologie pour la conception de systèmes interactifs mixtes utilisables.

A moyen terme, nous envisageons d'intégrer les aspects cognitifs, émotionnels, psychologiques des utilisateurs dans les modèles d'Interaction Homme-Machine, ceci afin de modéliser la communication entre l'utilisateur et l'interface au lieu de se limiter uniquement à modéliser la relation entre eux. A partir de ces modèles de communication, nous pouvons traiter par la suite les situations de mauvaise interaction ou appelées également « erreurs d'interaction » qui peuvent se produire lors de la manipulation de l'interface. A ce jour, ce créneau est rarement traité surtout dans le cas des systèmes interactifs mixtes.

De plus, nous envisageons, sur la base de la méthodologie proposée, d'intégrer les interactions de réalité mixte dans les modèles d'architectures logicielles existants dans la littérature, et ce, pour raffiner le développement des systèmes interactifs mixtes. Nous projetons, aussi, d'étudier l'influence des besoins techniques (branche de droite de la méthode 2TUP) dans le développement des systèmes interactifs mixtes.

Pour le deuxième volet, le système interactif d'aide à la maintenance développé dans le quatrième chapitre mérite d'être amélioré. En effet, l'implémentation des modules de suivi et d'interaction nécessite d'explorer plus profondément les méthodes de reconnaissance et de suivi robuste en temps réel en utilisant des objets physiques de la scène réelle. Dans la littérature, deux principales approches sont explorées, les algorithmes basés primitives et les algorithmes basés sur une connaissance d'un modèle (2D ou 3D). Cependant, les méthodes actuelles ne sont pas en mesure de nous fournir des solutions efficaces (traitement lourd, changement des paramètres de l'environnement, déformation de la scène, etc.) pour le développement de notre système d'aide. Notre projetons, à moyen terme, de concevoir pour une application d'aide à la maintenance une approche de suivi et d'interaction plus performante en développant des méthodes robustes de suivi et de reconnaissance d'objets physiques de la scène réelle.

Les premiers résultats obtenus durant les tests des interfaces interactives développées avec un ensemble d'utilisateurs montrent que notre système constitue un moyen efficace pour retranscrire les informations nécessaires à l'intervention sur le champ de vision de l'opérateur. Bien que nos résultats expriment un potentiel favorable, nous devons poursuivre nos expérimentations sur un échantillon de tests plus important (faire appel à de vrais opérateurs de maintenance) pour que les tendances, parfois fortes, soient statistiquement significatives. En outre, nous envisageons d'intégrer, dans l'outil d'aide, de nouvelles données provenant des expérimentations (nouveaux questionnaires, nouveaux indicateurs, etc.) ainsi que de générer des environnements virtuels pour l'évaluation. A moyen terme, nous pensons qu'il est nécessaire de modéliser le comportement et les caractéristiques liés à l'état des utilisateurs durant les expérimentations.

En perspective, aussi, nous envisageons d'évaluer expérimentalement l'évolution des activités de maintenance en utilisant des méthodes formelles telles que les méthodes statistiques (analyse de la variance, etc.). Les résultats seront comparés, par la suite, avec ceux obtenus empiriquement dans le quatrième chapitre.

D'autre part, nous devons réaliser des expérimentations pour évaluer le processus de coopération et observer le comportement de l'expert distant qui partage le même espace interactive visuel de l'opérateur. Dans le même contexte, un travail de recherche sera consacré à l'extension du processus de coopération, dans le cadre de la maintenance, au processus de collaboration. L'objectif est de permettre à plusieurs opérateurs de travailler ensemble, autour d'un même équipement, dans l'accomplissement d'une tâche complexe, ceci en utilisant les systèmes d'aide de réalité mixte. Un travail de recherche sera particulièrement consacré aux approches d'aide basées sur l'interaction 3D collaborative en réalité mixte.

Enfin, nous souhaitons élargir le champ d'action du système proposé en tant qu'outil pour la formation et l'apprentissage.

Références bibliographiques

- [1] Abrahão, S., Poels, G., Pastor, O., ‘Comparative Evaluation of Functional Size Measurement Methods: An Experimental Analysis’. *Information and Software Technology*, Vol. 49, pp. 366–380, 2007.
- [2] Afnor., norme NF X 60-500., ‘Terminologie relative à la fiabilité, maintenabilité, disponibilité’. Edition Lavoisier, Octobre 1988.
- [3] Afnor., norme NF EN 13306 X 60–319., ‘Terminologie de la maintenance. Association Française de Normalisation’, Paris, 2001.
- [4] Amrani, H., ‘Conception et réalisation d’une application web pour la gestion et la planification des séances de télé-médecine’. Mémoire d’Ingénieur de l’Université de Blida, Algérie, 2009.
- [5] Anastassova, M., ‘L’analyse ergonomique des besoins en amont de la conception de technologies émergentes : le cas de la réalité augmentée pour la formation à la maintenance automobile’. Thèse de doctorat de l’Université René Descartes, Paris 5, France, 2006.
- [6] Andersson, M., Vestergren, P., ‘Object-Oriented Design Quality Metrics’. Uppsala Master’s Theses in Computer Science, University of Uppsala, Sweden, 2004.
- [7] Andro T., Chauvet J-M., ‘Objets métier’. Edition Eyrolles, Paris, 1998.
- [8] Azuma, R., ‘A survey of augmented reality’. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, N°4, pp 355–385, 1997.
- [9] Aouiz, S., Bellag, A., ‘Conception et réalisation d’une table interactive pour la manipulation de documents numériques’. Mémoire d’Ingénieur de l’Université de Blida, Algérie, 2011.
- [10] Bajec, M., Vavpotic, D., Furlan, S., Krisper, M., ‘Software Process Improvement Based on the Method Engineering Principles’. *IFIP International Federation for Information Processing*, Springer, pp. 283–297, 2007.
- [11] Bakri, M., Elibrani, M., Acharai, A., ‘Maintenance des Systèmes Solaires Photovoltaïques pour le pompage d’eau’. Rapport technique. Centre de Développement des Energie Renouvelables au Maroc avec la collaboration de la division de Sciences de l’Ingénieur de l’UNESCO, Morocco, 1995.
- [12] Balme, L., Demeure, A., Barralon, N., Coutaz, J., Calvary, G., ‘CAMELEON-RT: a software architecture reference model for distributed, migratable, and plastic user interfaces’. In 2nd European Symposium on Ambient Intelligence (EUSAI’04), ACM Press, Pennsylvania, USA, pp. 251–258, 2004.
- [13] Bandou, F., ‘Diagnostic de pannes d’un système de pompage photovoltaïque par le raisonnement à partir de cas’. Mémoire de Magister de l’Université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2010.
- [14] Bangemann, T., Rebeuf, X., Reboul, D., Schulze, A., Szymanski, J., Thomesse, J-P., Thron, M., Zerhouni, N., ‘PROTEUS—Creating distributed maintenance systems through an integration platform’. *Computers in Industry Journal*, Elsevier, Vol 57, pp. 539–551, 2006.

- [15] Bass, L., Faneuf, R., Little, R., Mayer, N., Pellegrino, B., Reed, S., Seacord, R., Sheppard, S., Szczur, M., 'A Metamodel for the Runtime Architecture of an Interactive System'. ACM Special Interest Group Computer-Human Interface bulletin (SIGCHI), Vol.24, n°1, pp. 32–37, 1992.
- [16] Bastien, J, M, C., Scapin, D., 'Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems'. Behaviour and Information Technology, Vol. 16, pp. 220 – 231, 1997.
- [17] Baudin, V., 'Interfaces Homme-Machine'. Conférence COMPIL: IHM, juin 2008.
- [18] Bauer, M., Bruegge, B., Klinker, G., MacWilliams, A., Reicher, T., Rib, S., Sandor, C., Wagner, M., 'Design of a Component-Based Augmented Reality Framework'. In Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, New York, pp. 45–54, 2001.
- [19] Beck, K., 'Extreme Programming Explained: Embrace Change'. Addison-Wesley, 1999.
- [20] Bellarbi, A., **Benbelkacem, S.**, Malek, S., Zenati-Henda, N., 'Amélioration des performances d'ARToolKit pour la réalisation d'applications de réalité augmentée'. Second International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA'10), Biskra, Algérie, Décembre 2010.
- [21] Bellarbi, A., Domingues, C., Otmane, S., **Benbelkacem, S.**, Dinis, A., 'Underwater augmented reality game using the DOLPHYN'. In Proceedings of the 18th ACM symposium on Virtual reality software and technology, Toronto, Canada, pp. 187-188, december 2012.
- [22] Bellarbi, A., Belghit, H., **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., 'Hand Gesture Recognition Using Contour based Method for Tabletop Surfaces'. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC'13), Evry, Paris, April 2013.
- [23] Bellarbi, A., Domingues, C., Otmane, S., **Benbelkacem, S.**, Dinis, A., 'Augmented Reality for Underwater activities with the Use of the DOLPHYN'. In Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC 2013), Evry, Paris, pp. 409 – 412, April 2013.
- [24] Bellik, Y., Teil, D., 'Dénitritions terminologiques pour la communication multimodale'. Dans quatrième Journées sur l'ingénierie des Interfaces Homme-Machine (IHM'92), 1992.
- [25] Bellik, Y., 'Interfaces multimodales : concepts, modèles et architectures'. Thèse de doctorat de l'Université de Paris-XI, France, Mai 1995.
- [26] **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., Malek, S., 'Augmented reality platform for solar systems maintenance assistance'. In Proceedings of the 1st International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (EFEEA'10), Ghardaia, Algeria, 2010.
- [27] **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Zerarga, F., Bellarbi, A., Belhocine, M., Malek S., Tadjine, M. 'Augmented Reality Platform for Collaborative E-Maintenance Systems'. In Andrew Yeh Ching Nee – InTech, (Ed.): 'Augmented Reality - Some Emerging Application Areas', pp. 211–226, December 2011.

- [28] **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., ‘Interactive Space for Management of Documents in a Maintenance Context’. In Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, Tangier, Morocco, pp 378 – 383, May 2012.
- [29] **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., ‘HCI Knowledge in Software Engineering Practices for Designing Interactive Maintenance Assistance Systems’. In Proceedings of the 36th IEEE International Conference on Computer Software and Applications, Izmir, Turkey, pp.362-363, July 2012.
- [30] **Benbelkacem, S.**, Belhocine, M., Bellarbi, A., Zenati-Henda, N., Tadjine, M., ‘Augmented reality for photovoltaic pumping systems maintenance tasks’. Renewable Energy, Elsevier, Vol. 55, pp. 428-437, 2013.
- [31] **Benbelkacem, S.**, Belhocine, M., Zenati-Henda, N., Bellarbi, A., Tadjine, M., ‘Integrating HCI and Business Practices for Mixed Reality Systems Design: a Case Study’. IET Software, Vol. 7, pp. 1-16, September 2013.
- [32] Benganem, M., Hadj-Arab, A., ‘Photovoltaic water pumping systems for Algeria’. Desalination, Elsevier, pp. 50–57, 2007.
- [33] Bennouar, D., ‘Présentation du projet e-APC’. 1^{ères} Journées sur les TIC à forte valeur ajoutée pour les organisations JTIC’09, Alger, Algérie, 2009.
- [34] Berners-Lee, T., Cailliau, R., Luotonen, A., Frystyk Nielsen, H., Secret, A., ‘The World-Wide Web V0’. Communication of the ACM, N°37, pp 76-82, 1994.
- [35] Bimber, O., Raskar, R., ‘Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds’. AKPeters, Ltd.,2005.
- [36] Boehm, B., ‘Software Engineering Economics’. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1981.
- [37] Boehm, B., Gray, T.E., Seewaldt T., ‘Prototyping versus specifying: a multiproject experiment’. IEEE Transactions on Software Engineering, May 1984.
- [38] Bolt, R. A., ‘put-that-there: Voice and gesture at the graphics interface’. In Proceedings of the 7th Annual Conference on Computer graphics and Interactive techniques (SIGGRAPH ’80), New York, USA, pp. 262–270, 1980.
- [39] Bortolaso, C., Bach, C., Dubois, E., ‘MACS: combination of a formal mixed interaction model with an informal creative session’. In Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI symposium on Engineering interactive computing systems, (EICS'11), Pisa, Italy, pp. 63–72, June 2011.
- [40] Bostanci, E., Kanwal, N., Ehsan, S., Clark, A. F., ‘Tracking methods for augmented reality’. In Proceedings of the International Conference on Machine Vision (ICMV’10), Hong Kong, pp. 425–429, 2010.
- [41] Bottecchia, S., ‘Système T.A.C. : Télé-Assistance Collaborative. Réalité augmentée et NTIC au service des opérateurs et des experts dans le cadre d’une tâche de maintenance industrielle supervisée’. Thèse de Doctorat de l’Université de Toulouse III, France, 2010.
- [42] Bouchaib, S., Abdeladim, K., Hadj-Arab, A., Hamidat, A., Bandou, F., ‘Station de pompage photovoltaïque’. Rapport technique. Centre de Développement des Energie Renouvelables (CDER), Alger, 2009.

- [43] Bouchet, J., Nigay, L., 'ICARE : a component-based approach for the design and development of multimodal interfaces'. Extended abstracts, Human factors in computing systems (In CHI'04), New York, USA, pp. 1325–1328, 2004.
- [44] Bouzidi, B., 'Viability of solar or wind for water pumping systems in the Algerian Sahara regions – case study Adrar'. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier. Vol. 15, pp. 4436–4442, 2011.
- [45] Bowman, D. A., 'Interaction Techniques for Common Tasks in Immersive Virtual Environments: Design, Evaluation, and Application'. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 1999.
- [46] Brangier, E., 'Approche ergonomique de l'assistance technique à l'homme : vers un modèle de la symbiose homme-technologie-organisation ?'. Dans IHM et assistance technique, pp. 48–56, 2001.
- [47] Brangier, E., Bobillier-Chaumon, M-E., Cybis De Abreu, W., Michel, G., Pino, P., Van De Weerd, C., 'Analyse psycho-ergonomique de l'interaction entre l'homme et les NTIC: introduction à une psychologie de l'environnement digital'. Revue Hygiène et Sécurité du travail (INRS). N°189, pp. 15-25, 2002.
- [48] Brangier, E., Barcenilla, J., 'Concevoir un produit facile à utiliser : Adapter les technologies à l'homme'. Edition d'organisation, Paris, 2003.
- [49] Brangier, E., 'Comment améliorer la performance de l'opérateur par des dispositifs d'aide au travail ?'. Dans Lévy-Leboyer, C, Louche, C., et Rolland, J-P (Eds), Management des organisations. Edition d'organisation (Paris), pp. 429–450, 2007.
- [50] Brenier, H., 'Les spécifications fonctionnelles : automatismes industriels et temps réel'. Editions Dunod, Paris 2001.
- [51] Caffiau, S., Scapin, D., Girard, P., Baron, M., Jambon, F., 'Increasing the expressive power of task analysis: systematic comparison and empirical assessment of tool-supported task models'. Interacting with Computers, Elsevier, Vol. 22, pp. 569–593, 2010.
- [52] Calvez, J.P., 'Spécification et conception des systèmes : une méthodologie'. Editions Masson, Paris, 1990.
- [53] Card, S., Moran, T. P., Newell, A., 'The Psychology of Human Computer Interaction'. Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [54] Carroll, J. M., 'Scenario-based design'. In Handbook of Human-Computer Interaction, M. Helander, T. K. Landauer, and P. Prabhu, Eds. Elsevier Science B.V., pp. 383–406, 1997.
- [55] Carroll, J. M., 'Five reasons for scenario-based design'. Interacting with Computers, Vol. 13, N°1, pp. 43 – 60, 2000.
- [56] Casiez, G., 'Introduction aux IHMs'. Cours Master 1 Informatique. Université de Lille 1, France, 2008.
- [57] Caudell, T. P., Mizell, D.W., 'Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes'. Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA, pp. 659-669, 1992.
- [58] Chalou, R., 'Réalité Mixte et Travail Collaboratif : IRVO, un modèle de l'Interaction Homme–Machine'. Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France, 2004.

- [59] Chalon, R., David, B. T. 'IRVO: an Interaction Model for Designing Collaborative Mixed Reality Systems'. In Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction (HCII'05), Las Vegas, Nevada, USA, pp. 1–10, July 2005.
- [60] Chaparro, A., Groff, L. S., Chaparro, B. S., Scarlett, D., 'Survey of aviation technical manuals phase 2 report: User evaluation of maintenance documents'. Technical Report: DOT/FAA/AR-02/34. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, D.C. 20591, 2002.
- [61] Changzhi, K., Bo, K., Dongyi, C., Xinyu, L., 'An Augmented reality-based Application for Equipment Maintenance'. Book Chapter. Advances in Artificial Reality and Tele-Existence, Springer-Verlag, Vol. 3784, pp 836-841, 2005.
- [62] Charfi, S., Dubois, E., Bastide, R., 'Articulating interaction and task models for the design of advanced interactive systems'. In Proceedings of 6th International workshop on TASK MODELS and DIAGRAMS (TAMODIA'07), Springer-Verlag, Vol. 4849, pp. 70–83, 2007.
- [63] Charfi, S., Scapin, D. L., Dubois, E., 'Identification et prise en compte de propriétés ergonomiques pour la modélisation et la conception de SIM'. In Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '08), New York, USA, pp. 55–62, 2008.
- [64] Charfi, S., 'Conception et Evaluation des Systèmes Interactifs Mixtes selon une Approche Centrée Utilisateur'. Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse I, France, 2009.
- [65] Chuffart, F., 'Conception d'une plate-forme de services ubiquitaires intégrant des interfaces multimodales distribuées'. Thèse de Doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, France, 2007.
- [66] Chebel-Morello, B., Medjaher, K., Hadj-Arab, A., Bandou, F., Bouchaib, S., Zerhouni, N., 'E-maintenance for photovoltaic power generation system'. Energy Procedia, Elsevier, Vol. 18, pp. 640 – 643, 2012.
- [67] Cieutat, J-M., 'Quelques applications de la réalité augmentée : Nouveaux modes de traitement de l'information et de la communication Effets sur la perception, la cognition et l'action'. Mémoire pour l'obtention du titre d'Habilitation à Diriger des Recherches, France, 2013.
- [68] Collins, D., 'Designing Object-oriented user interfaces'. Readwoods City, CA: Benjamin/Cummings Publishing Inc, 1995.
- [69] Constantine, L. L., Lockwood, L. A. D., 'Structure and Style in Use Cases for User Interfaces'. In Van Harmelan, M. (Ed.): 'Object Modeling and User Interface Design', Boston: Addison Wesley, USA, pp. 245–279, 2001.
- [70] Constantine, L. L., Biddle, R., Noble, J. 'Usage-centered design and software engineering: Models for integration'. In Proceedings of the IFIP TC13 workshop on Closing the gaps: Software engineering and Human-Computer Interaction, M. B. Harning and J. Vanderdonck, Eds, 2003.
- [71] Coutaz, J., 'Interface Homme-Ordinateur: Conception et réalisation'. Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, Décembre 1988.
- [72] Coutaz, J., Caelen, J., 'A taxonomy for multimedia and multimodal user interface'. In Proceedings of the 1st ERCIM Workshop on Multimodal Human-Computer Interaction, Lisbon, November 1991.

- [73] Coutrix, C., Nigay, L., 'Mixed reality: A model of mixed interaction'. In Proceedings of the 8th International Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI'2006), ACM Press, pp. 43–50, Venezia, Italy, may 2006.
- [74] Couturier, J-M., 'Interaction Homme-Machine'. Support de cours, ENSEIRB, France, décembre 2007.
- [75] Curtis, B., Hefley, B., 'A WIMP No More: The Maturing of User Interface Engineering'. Interactions, pp. 23-34, 1994.
- [76] Dangelmaier, W., Fischer, M., Gausemeier, J., Grafe, M., Matysczok, C., Mueck, B., 'Virtual and augmented reality support for discrete manufacturing system simulation'. Computers in Industry, Elsevier, Vol. 56, pp. 371–383, 2005.
- [77] Darcy, D. P., Kemerer, C. F. 'Managerial use of Metrics For Object Oriented Software: An Exploratory Analysis'. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 24, pp. 629–639, 1998.
- [78] Davis, F. D., 'Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use and User Acceptance of Information Technology'. MIS Quarterly, Vol. 13, No 3, pp. 319–340, 1989.
- [79] Davis, F. D., Bagozzi, R. P., Warshaw, P. R., 'User Acceptance of Computer Technology: A Comparison of Two Theoretical Models'. Management Science, Vol. 35, pp. 982–1003, 1989.
- [80] Didier, J-Y., 'Contributions à la dextérité d'un système de réalité augmentée mobile appliqué à la maintenance industrielle'. Thèse de Doctorat de l'Université d'Evry, France, 2005.
- [81] Drasic, D., Milgram, P., 'Perceptual issues in augmented reality'. In S. S. Fisher, M.T. Bolas, & J. O.Merritt (Eds.). Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III. San Jose, CA: SPIE, pp. 123–134, 1996.
- [82] Doherty-Sneddon, G., Anderson, A., O'Malley, C., Langton, S., Garrod, S., Bruce, V., 'Face-to-face and video mediated communication: A comparison of dialogue structure and task performance'. In Journal of Experimental Psychology, Vol. 3, pp. 105–125, 1997.
- [83] Dowlatshahi, S., 'The Role of Industrial Maintenance in the Maquiladora Industry: An Empirical Analysis'. International Journal of Production Economics, Elsevier, Vol. 114, N°1, pp. 298-307, 2008.
- [84] Dubois, E., 'Chirurgie Augmentée, un cas de Réalité Augmentée. Conception et réalisation centrées sur l'utilisateur'. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 2001.
- [85] Dubois, E., Gray, P. D., Nigay, L., 'ASUR++: A design notation for mobile mixed systems'. Interacting With Computers, Elsevier, Vol. 15, 497–520, 2003.
- [86] Dupont, G., 'The dirty dozen errors in maintenance'. In the 11th Symposium on Human Factors in Maintenance and Inspection: Human Error in Aviation Maintenance. Washington, DC: FAA, 1997.
- [87] Eckstein, R., 'Java SE Application Design With MVC'. Sun Microsystems Inc., 2007.
- [88] Embrey, D., 'Preventing human error: Developing a consensus led safety culture based on best practice'. Human Reliability Associates Ltd, 2000.
- [89] Feiner, S., Macintyre, B., Seligmann, D., 'Knowledge-based augmented reality'. Communications of the ACM–Special issue on computer augmented environments, Vol. 36, N° 7, pp. 53–62, 1993.

- [90] Fiala, M., 'Artag, a fiducial marker system using digital techniques'. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '05), San Diego, California, USA, pp. 590–597, June 2005.
- [91] Fournier-Morel, X., Grojean, P., Plouin, G., Rognon, C., 'SOA, le guide de l'architecte du SI'. Deuxième édition, Dunod, 2008.
- [92] Gabay J., 'Merise vers OMT et UML : un guide complet avec études de cas'. Troisième édition, InterEditions, Paris 1998.
- [93] Gauffre, G., 'Couplage de la modélisation et de l'implémentation des systèmes interactifs mixtes'. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse 1, France, Décembre 2009.
- [94] Godet-Bar, G., 'Spécification et outillage d'une méthode de conception des systèmes de réalité mixte'. Thèse de doctorat de l'Université de l'Institut polytechnique de Grenoble, France, 2009.
- [95] Godet-Bar, G., Rieu, D., Dupuy-Chessa, S., 'HCI and business practices in a collaborative method for augmented reality systems'. Information and Software Technology, Elsevier, Vol. 52, pp. 492–505, 2010.
- [96] Grosjean, V., 'Assistance à la conduite dans les situations dynamiques : influence de la construction d'une perspective temporelle sur la performance experte'. Thèse de Doctorat de l'Université de Liège, 1999.
- [97] Guenineche, Z., Guezil, M., 'Conception et réalisation d'un système d'information de gestion de stock et d'approvisionnement interfacé avec le système commercial et le système de production de l'ONAAPH'. Mémoire d'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique, Oued-Essemar, El-Harrach, Alger, Algérie, 2010.
- [98] Hamidat, A., Benyoucef, B., 'Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage'. Energy Policy, Elsevier, Vol. 37, pp. 1489–1501, 2009.
- [99] Hartson, H. R., Siochi, A. C., Hix, D., 'The UAN: A user-oriented representation for direct manipulation interface designs'. Transactions on Information Systems (TOIS), Vol. 8, pp. 181–203, 1990.
- [100] Hassine, I., 'Spécification et formalisation des démarches de développement à base de composants métier: la démarche Symphony'. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France, 2005.
- [101] Haton, J-P., Pierrel, J-M., Perennou, G., Caelen, J., Gauvain, J-L. 'Reconnaissance automatique de la parole'. Dunod Informatique, Paris, 1991.
- [102] Hay, S., Newman, J., Harle, R., 'Optical Tracking Using Commodity Hardware'. In Proceedings of the IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'08), Cambridge, United Kingdom, pp. 159–160, 2008.
- [103] Henderson, S., Feiner, Steve., 'Augmented reality for maintenance and repair (ARMAR)'. Technical Report AFRL-RH-WPTR-2007-0112. United States Air Force Research Lab, 2007.
- [104] Henderson, S. J., Feiner, S., 'Opportunistic controls: leveraging natural affordances as tangible user interfaces for augmented reality'. In Proceedings of the ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST'08), New York, USA, pp. 211–218, 2008.

- [105] Henderson, S. J., Feiner, S., ‘Evaluating the benefits of augmented reality for task localization in maintenance of an armored personnel carrier turret’. In Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’09), Washington, DC, USA, pp. 135–144, 2009.
- [106] Henderson, S., Feiner, S., ‘Opportunistic tangible user interfaces for augmented reality’. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 16, pp. 4–16, 2010.
- [107] Hugues, O., ‘Réalité Augmentée pour l’Aide à la Navigation. SIGMA : Système d’Information Géographique Maritime Augmenté’. Thèse de doctorat de l’Université de Bordeaux I, France, 2011.
- [108] Ishii, H., Ullmer, B. A., ‘Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms’. In Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, Atlanta, Georgia, United States: ACM, pp. 234-241, 1997.
- [109] Ishii, H., Ratti, C., Piper, B., Wang, Y., Biderman, A., Ben-Joseph E., ‘Bringing Clay and Sand into Digital Design - Continuous Tangible user Interfaces’. BT Technology Journal, Vol. 22, N° 4, pp. 287-299, 2004.
- [110] Jacobson, I., ‘Basic use case modeling’. Report on object analysis and design, Vol. 1, pp. 15–19, 1994.
- [111] Jacobson, I., Booch, G., Rumbaugh, J., ‘The Unified Software Development Process’. Addison-Wesley, 1999.
- [112] Jean-Daubias, S., ‘Introduction à l’IHM et historique’. Cours de 3^{ème} année. Licence spécialité Informatique. Université Claude Bernard Lyon 1, France, 2009.
- [113] Kato, H., Billinghamurst, M., Asano, M., Tachibana, K., ‘An Augmented Reality System and its Calibration based on Marker Tracking’. Transactions of the Virtual Reality Society of Japan, Vol. 4, pp. 607–616, 1999.
- [114] Kettani, N., Mignet, D., Paré, P., Rosenthal-Sabroux, C., ‘De Merise à UML’. Eyrolles, 2001.
- [115] Komonen, K., ‘A Cost Model of Industrial Maintenance for Profitability Analysis and Benchmarking’. International Journal of Production Economics, Elsevier, Vol. 79, N°1, pp. 15-31, 2002.
- [116] Krasner, G., Pope, S., ‘A description of the model-view-controller user interface paradigm in the smalltalk-80 system’. Journal of Object Oriented Programming, Vol. 1, pp. 26 –49, 1988.
- [117] Lecerof, A., Paternò, F., ‘Automatic Support for Usability Evaluation’. IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. 24, pp. 863–888, 1998.
- [118] Luxhoj, J. T., Riis, J. O., Thorsteinsson, U., ‘Trends and Perspectives in Industrial Maintenance Management’. Journal of Manufacturing Systems, Elsevier, Vol. 16, N°6, pp. 437-453, 1997.
- [119] Mackay, W., Velay, G., Carter, K., Ma, C., Pagani, Daniele., ‘Augmenting reality: adding computational dimensions to paper’. Communications of the ACM Vol. 36, N° 7, pp. 96-97, 1993.
- [120] Marsot, J., Govaere, V., ‘Prévention des risques en maintenance industrielle : apports et limites des techniques de réalité augmentée’. In Proceedings of the 20th International Conference of the Association Francophone d’Interaction Homme-Machine (IHM’08), New York, USA, pp 51–54, 2008.

- [121] Marsot J., Gardeux F., Govaere V., 'Réalité augmentée et prévention des risques, Apports et limites'. *Revue Hygiène et sécurité du travail*, pp. 15-23, 2009.
- [121] Marx, D. A., Graeber, R. C., 'Human error in aircraft maintenance'. Technical report. Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, 1993.
- [123] Milgram, P., Kishino, F., 'A taxonomy of mixed reality visual displays'. *IEICE Transactions on Information and Systems. Special Issue on Networked Reality*, number E77-D (12), pp.1321-1329, 1994.
- [124] Mizouni, R., Sinnig, D., Khendek, F., 'Enriching Use Cases with CTTS'. In *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS)*, Oxford, United Kingdom, pp 262–263, March 2010.
- [125] Moody, D. L., 'The Method Evaluation Model: A Theoretical Model for Validating Information Systems Design Methods'. In *Proceedings of the 11th European Conference on Information Systems*, Naples, Italy, pp. 1327–1336, June 2003.
- [126] Mori, G., Paternò, F., and Santoro, C., 'CTTE: Support for Developing and Analyzing Task Models for Interactive System Design'. *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 28, pp. 797 – 813, 2002.
- [127] Mouloudi, A., 'Intégration des besoins des utilisateurs pour la conception de systèmes d'information interactifs Application à la conception d'un système d'information voyageurs multimodal (SIVM)'. Thèse de doctorat de l'Université de Technologie de Compiègne, France, 2007.
- [128] Naud, M., 'Contribution au développement d'outils d'aide à la conception assistée par la réalité virtuelle et augmentée : application au domaine du textile/habillement'. Thèse de doctorat de l'Université d'Angers, France, 2008.
- [129] Navarre, D., 'Contribution à l'ingénierie en Interaction Homme-Machine : une technique de description formelle et un environnement pour une modélisation et une exploitation synergiques des tâches et du système'. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse I, France, 2001.
- [130] Negroponte, N., 'L'Homme Numérique'. Editeur : Robert Laffont, Paris, 1995.
- [131] Neumann, U., Majoros, A., 'Cognitive, performance, and systems issues for augmented reality applications in manufacturing and maintenance'. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Annual International Symposium (VRAIS'98)*, pp. 4-11, Washington, USA, 1998.
- [132] Nigay, L., Coutaz, J., 'A design space for multimodal systems: concurrent processing and data fusion. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems (CHI'93)*, New York, USA, pp. 172–178, 1993.
- [133] Nigay, L., Salembier, P., Marchand, T., Renevier, P., and Pasqualetti, L., 'Mobile and Collaborative Augmented reality: A Scenario Based Design Approach'. In *Proceedings of the 4th International Symposium on Mobile Human-Computer Interaction*, Pisa, Italy, pp. 241–255, September 2002.
- [134] Norman, D. A., 'Things that make us smart: defending human attributes in the age of the machine'. In Perseus Press, May 1994.
- [135] Norman, D. A., 'Human-centered design considered harmful'. *Interactions*, Vol. 12, N° 4, pp. 14–19, 2005.

- [136] Novick, D. G., Ward, K., ‘What users say they want in documentation’. In Proceedings of the 24th annual ACM international conference on Design of communication (SIGDOC’06), New York, USA, pp. 84–91, 2006.
- [137] Novick, D. G., Ward, K., ‘Why don’t people read the manual ?’. In Proceedings of the 24th annual ACM international conference on Design of communication (SIGDOC’06), New York, USA, pp. 11–18, 2006.
- [138] Otmane, S., ‘Modèles et techniques logicielles pour l’assistance à l’interaction et à la collaboration en réalité mixte’. Mémoire pour l’obtention du titre d’Habilitation à Diriger des Recherches. Université d’Evry Val d’Essonne, France, Décembre 2010.
- [139] Otsu, N., ‘A threshold selection method from gray-level histograms’. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, Vol. 9, pp. 62–66, 1979.
- [140] Ouramdane, N., ‘Vers un système d’assistance à l’interaction 3D pour le travail et le télétravail collaboratif dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée’. Thèse de Doctorat de l’Université d’Evry, Paris, France, 2008.
- [141] Paternò, F., Mancini, C., Meniconi, S., ‘ConcurTaskTrees: Diagrammatic notation for specifying task models’. In Proceedings of the 6th International Conference on Human-Computer Interaction, Sydney, Australia, pp. 362–369, July 1997.
- [142] Paternò, F., ‘The handbook of task analysis for human-computer interaction’. Lawrence Erlbaum Associates, ch. ConcurTaskTrees: An Engineered Notation for Task Models, pp. 483–503, 2003.
- [143] Patankar, M. S., ‘Root cause analysis of rule violations by aviation maintenance technicians’. Technical Report. Grant No. 2001-G-001 FAA. Office of Aviation Medicine, Washington, DC, 2002.
- [144] Platonov, J., Heibel, H., Meier, P., Grollmann, B., ‘A mobile markerless AR system for maintenance and repair’. In Proceedings of the 5th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’06), Washington, USA, pp. 105–108, 2006.
- [145] Puzenat, D., ‘La recherche globale et locale en TIC’. Conférence sur la R&D et TIC, Université Antilles-Guyane, Décembre 2008.
- [146] Rasovska, I., ‘Contribution à une méthodologie de capitalisation des connaissances basée sur le raisonnement à partir de cas : Application au diagnostic dans une plateforme d’e-maintenance’. Thèse de doctorat de l’Université de Franche-Comté, Besançon, France, 2006.
- [147] Reason, J., ‘Managing the Risks of Organizational Accidents’. Ashgate Publishing Company, December 1997.
- [148] Reicher, T., MacWilliams, A., Bruegge B., ‘Towards a System of Patterns for Augmented Reality Systems’. In Proceedings of the International Workshop on Software Technology for Augmented Reality Systems, Tokyo, Japan, pp. 6–11, October 2003.
- [149] Rekimoto, J., Nagao, K., ‘The world through the computer: computer augmented interaction with real world environments’. In Proceedings of the 8th Annual ACM symposium on User Interface and Software Technology. Pittsburgh, Pennsylvania, United States, pp. 29-36, 1995.
- [150] Renevier, P., ‘Systèmes Mixtes Collaboratifs sur Supports Mobiles: Conception et Réalisation’. Thèse de doctorat de l’Université de Grenoble, France, 2004.

- [151] Rettig, M., 'Prototyping for tiny fingers'. *Communications of the ACM*, Vol. 37, N° 4, pp. 21-27, 1994.
- [152] Riess, P., Stricker, D., 'AR on-demand: a practicable solution for augmented reality on low-end handheld devices'. *AR/VR Workshop of the Germany Computer Science Society*. Coblenz, Germany, 2006.
- [153] Retour, D., Bouche, M. Plauchu, V., 'Où va la maintenance industrielle ? Problèmes économiques'. N° 2.159, pp. 7-13, Janvier 1990.
- [154] Reyterou, C. L., 'Une méthodologie pour l'intégration des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication dans les processus de Maintenance Aéronautique'. Thèse de doctorat, École Centrale Paris, France, 2002.
- [155] Roques, P., Vallée, F., 'UML 2 en action'. Edition Eyrolles, 2004.
- [156] Rosson, M. B., Carrol, J. M., 'Scenario-based Design'. In J. Jacko & A. Sears (Eds.), *The Human-Computer Interaction Handbook: Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*, Chapter 53, pp. 1032-1050, 2002.
- [157] Royce, W. W. 'Managing the development of large software systems'. In *Proceedings of IEEE WESCON*, pp. 328–338, August 1970.
- [158] Sakata, N., Kurata, T., Kato, T., Kourogi, M., Kuzuoka, H., 'WACL: Supporting telecommunications using wearable active camera with laser pointer'. In *Proceedings of the 7th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC'03)*, Washington, DC, USA, page 53, 2003.
- [159] Sakata, N., Kurata, T., Kuzuoka, H., 'Visual assist with a laser pointer and wearable display for remote collaboration'. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Collaboration Technologies (CollabTech'06)*, Tsukuba, Japan, pp. 66-71, 2006.
- [160] Samaan, K., 'Prise en Compte du Modèle d'Interaction dans le Processus de Construction et d'Adaptation d'Applications Interactives'. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon, France, 2006.
- [161] Scapin, D. L., Bastien, J. M. C., 'Analyse des tâches et aide ergonomique à la conception: l'approche MAD*'. Dans *Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les Systèmes d'Information* (édité par Christophe Kolski), Hermes, Vol. 1, pp. 85-116, 2001.
- [162] Schwald, B., Figue, J., Chauvineau, E., Vu-Hong, F., Robert, A., Arbolino, M., Schnaider, M., Laval, B., Dumas de Rauly, F., Anez, F.G., Baldo, O., and Santos. J., 'STARMATE: Using Augmented Reality technology for computer guided maintenance of complex mechanical elements'. *E-work and E-Commerce*, IOS Press, Vol. 1, pp. 196-202, 2001.
- [163] Sebillotte, S., 'Methodology guide to task analysis with the goal of extracting relevant characteristics for human-computer interfaces'. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 7, N° 4, pp. 341–363, 1995.
- [164] Shelton B. E., Hedley, N. R., 'Using augmented reality for teaching earthsun relationships to undergraduate geography students'. In *First 1st International Augmented Reality Toolkit Workshop*, Darmstadt, Germany, 2002.
- [165] Orit Shaer and Eva Hornecker. 'Tangible user interfaces : Past, present, and future directions'. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, Vol. 3, N° 1–2, pp. 1–137, 2010.
- [166] Clancy, T., 'The Standish Group report: CHAOS'. Technical report, Standish Group, 1995.

- [167] State, A., Hirota, G., Chen, D.T., Garrett, W.F., Livingston, M.A., ‘Superior augmented reality registration by integrating landmark tracking and magnetic tracking’. In Proceedings of the ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH’96), Los Angless, USA, pp. 429–438, 1996.
- [168] Stedmon, A. W., Stone, R. J., ‘Re-viewing reality: human factors of synthetic training environments’. International Journal of Human-Computer Studies, Elsevier, Vol. 55, N°4, pp. 675–698, 2001.
- [169] Seichter, H., Looser, J., Billinghamurst, M., ‘ComposAR: An intuitive tool for authoring AR applications’. In Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR’08), Washington, USA, pp. 177–178, 2008.
- [170] Spadoni, M., ‘Système d’information centré sur le modèle CIMOSA dans un contexte d’entreprise étendue’. Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), Vol. 38, N° 5, pp. 497-525, 2004.
- [171] Sutherland, I., ‘Sketch pad a man-machine graphical communication system’. In Spring Joint Computer Conference, Vol. 23, pp. 329-346, 1963.
- [172] Tang, A., Owen, C., Biocca, F., Mou, Weimin., ‘Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly’. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI’03), New York, USA, pp. 73–80, 2003.
- [173] Tarpin-Bernard, F., ‘Travail coopératif synchrone assisté par ordinateur: Approche AMF-C’, Thèse de doctorat de l’Ecole Centrale de Lyon, France, 1997.
- [174] Ukcaa. ‘Maintenance error’. Technical report. Asia Pacific Air Safety (United Kingdom Civil Aviation Authority), 1992.
- [175] Ukcaa. ‘Aircraft maintenance incident analysis’. Reference: CAA paper 2009/05, (United Kingdom Civil Aviation Authority), July 2009.
- [176] Villemeur, A., ‘Sécurité de fonctionnement de systèmes industriels: fiabilité - facteurs humains – informatisation’. Collection : Direction des études et recherches d’Electricité de France (EDF), Edition Eyrolles, 822 pages, 1997.
- [177] Wang, R., Qian, X., ‘OpenSceneGraph 3.0: Beginner's Guide’. Book, 412 pages, December 2010.
- [178] Ward, K., Novick, D. G., ‘Hands-free documentation’. In Proceedings of the 21st annual international conference on Documentation (SIGDOC’03), New York, USA, pp. 147–154, 2003.
- [179] Wegner, P., ‘Why interaction is more powerful than algorithms’. In Communications of the ACM, N°40, pp 80–91, May 1997.
- [180] Weiser, M., ‘The Computer of the 21st Century’. In Scientific American, Vol. 265, N° 3, pp. 66-75, September 1991.
- [181] Weiser, M., ‘Some Computer Science issues in Ubiquitous Computing’. In Communications of the ACM, Vol. 36, N° 7, pp 75–84, 1993.
- [182] Wellner, P., Mackay, W., Gold, R., ‘Back to the real world’. In Communications of the ACM, Vol. 36, N° 7, pp. 24-26, 1993.
- [183] Wellner, P., ‘Interacting with paper on the DigitalDesk’. Communications of the ACM, Vol. 36, N° 7, pp. 87-96, 1993.

- [184] Westrup, C., 'Information Systems Methodologies in Use'. *Journal of Information Technology*, Vol. 8, pp. 267–275, 1993.
- [185] Wiedenmaier, S., Oehme, O., Schmidt, L., Luczak, H., 'Augmented reality (AR) for assembly processes design and experimental evaluation'. *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 16, N° 3, pp. 497 – 514, 2003.
- [186] Wuest, H., Vial, F., Stricker, D., 'Adaptive line tracking with multiple hypotheses for augmented reality'. In *Proceedings of the 4th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR'05)*, Vienna, Austria, pp. 62–69, 2005.
- [187] Wynekoop, J.L., Russo, N.L., 'Studying Systems Development Methodologies: An Examination of Research Methods'. *Information Systems Journal*, Vol. 7, N° 1, pp. 47–65, 1997.
- [188] Zenati-Henda, N., 'Contribution à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée pour la maintenance'. Thèse de doctorat de l'Université de Besançon, France, 2008.
- [189] Zérarga, F., **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., 'Designing distributed mobile platform for e-maintenance assistance'. *International Conference on Automation and Mechatronics (CIAM'11)*, Oran, Algérie, Novembre 2011.
- [190] Zhong, X. W., Boulanger, P., Georganas, N. D., 'Collaborative augmented reality: A prototype for industrial training'. In *21th Biennial Symposium on Communication*, Canada, pp. 387-391, 2002.

Webographie

- [Arvika] ARVIKA. Augmented reality for development, production, servicing. <http://www.arvika.de>, 1999.
- [Couedelo] P. Couedelo. CAMKA system. <http://www.camka.com>, 2006.
- [Digi_ocean] <http://www.digitalocean.fr/>.
- [Digi_sony] <http://www.ile-des-medias.com/fr/references/digital-media-doooh/sony-alifax.htm#.UnaTQ3-mhH0>.
- [HitLab] HitLab. BuildAR, <http://www.hitlabnz.org/wiki/buildar>, 2008.
- [Lri] <http://www.lri.fr/~mbl/ENS/IHM/ecole-in2p3/Cours/cours1.html>.
- [RA_mobile] <http://www.bridge-communication.com/actu/newsroom/realme%C2%AE-limmobilier-dentreprise-en-realite-augmentee-sur-les-mobiles>.
- [Wiki_test_utilisateur] http://fr.wikipedia.org/wiki/Test_utilisateur.
- [Wiki_xp] http://fr.wikipedia.org/wiki/Extreme_programming.

Annexe A

1. Notions et principes

Nous présentons, dans le premier volet de l'annexe A, quelques notions sur les systèmes interactifs et les technologies de communication.

1.1 Les systèmes Interactifs

En fonction des points de vue des chercheurs spécialisés dans le domaine de l'interaction homme-machine, plusieurs définitions de systèmes interactifs ont été proposées. Nous présentons ci-dessous deux de ces définitions, en plus de celle présentée dans la section I.6.1 du chapitre 1:

Définition 1 : Un système interactif est une application informatique qui prend en compte, au cours de son exécution, les informations communiquées par le ou les utilisateurs du système, et qui produit, au cours de son exécution, une représentation perceptible de son état interne [74], [Lri].

Définition 2 : Un système interactif est un système dont le fonctionnement dépend d'informations fournies par un environnement externe qu'il ne contrôle pas [17]. Les systèmes interactifs sont également appelés ouverts, par opposition aux systèmes fermés dont le fonctionnement peut être entièrement décrit par des algorithmes [56], [179].

A partir des différentes définitions présentées, nous pouvons distinguer deux concepts appartenant au même acronyme « IHM ». Ce dernier désigne, l'Interaction Homme-Machine ou L'interface Homme-Machine. Pour enlever l'ambiguïté, nous tenons à définir les deux concepts.

1.2 Interface Homme - Machine

C'est un ensemble de dispositifs matériels et logiciels permettant à un utilisateur d'interagir (commander, contrôler, superviser) avec un système interactif [25].

1.3 Interaction Homme - Machine

C'est un ensemble des aspects de la **conception**, de l'**implémentation** et de l'**évaluation** des systèmes informatiques interactifs [112].

1.4 Adaptation des Interfaces Homme - Machine

L'interaction homme-machine s'intéresse aux systèmes informatiques interactifs contrôlés par des utilisateurs humains. Du point de vue de la machine, l'humain a beaucoup de défauts : il est indécis, désordonné, inattentif, émotionnel, illogique [134]. Par contre, il présente une grande qualité : sa capacité d'adaptation.

Dans la plupart des travaux de recherche, le problème d'adaptation se pose entre le système interactif et leurs utilisateurs possédant, chacun, des spécificités particulières. Pour cela, deux approches d'adaptation ont été étudiées [112] :

1.4.1 Approche techno-centrée

Cette approche est centrée sur la machine et ses possibilités. C'est-à-dire que l'utilisateur doit s'adapter aux caractéristiques et aux spécificités de la machine. Dans ce cas, il doit effectuer des efforts considérables tant au niveau mental que physique pour s'adapter à l'interface. Cette approche présente, ainsi, des contraintes sévères à l'utilisateur.

1.4.2 Approche anthropo-centrée ou centrée utilisateur

Cette approche est centrée sur l'homme et ses besoins. Dans ce cas, c'est à la machine de s'adapter aux besoins de l'utilisateur. Cette approche semble plus adéquate si on veut développer des systèmes interactifs performants. Pour cela, la démarche de conception, de mise en œuvre et d'évaluation des systèmes interactifs doit donc être centrée sur l'utilisateur, ses activités et sur le contexte d'interaction.

I.5 Mode, modalité et média [65]

Les modes de communication font référence aux sens et aux moyens humains d'expression : le mode graphique fait référence à la vue ; le mode tactile fait référence au toucher ; le mode sonore fait référence à l'ouïe ; les modes gustatifs et odorants font référence au goût et à l'odorat. A ces références, s'ajoute la sensibilité somesthésique qui définit la perception que l'individu possède de son corps.

Une modalité est une forme particulière d'un mode de communication. Une photo, un graphique et une carte sont trois modalités du mode graphique.

Considérons un media comme un dispositif physique avec lequel interagit l'utilisateur. Un magnétophone est un média, au même titre qu'un téléphone, un microphone, ou une caméra.

Un système multimodal est défini comme étant capable, d'intégrer plusieurs modes de communication, et par extension plusieurs modalités. L'objet du système multimodal est l'interaction. C'est ce qui différencie un système multimédia (diffusion) d'un système multimodal (interaction) [72].

I.5.1 Interaction vocale [65]

En 1991, l'ouvrage [101] traitant de « la reconnaissance vocale » définit l'interaction vocale comme : l'interaction entre un utilisateur et un système complexe par le biais d'un dialogue évolué.

Les technologies vocales recouvrent plusieurs activités complémentaires : la synthèse vocale, consistant à produire un signal sonore ; la reconnaissance vocale, consistant à faire interpréter par une machine une commande vocale produite par le locuteur afin de réaliser une action précise ; l'enregistrement vocal, consistant à acquérir et stocker un signal afin de le stocker ou de le transmettre à une machine ; la vérification du locuteur, activité dans laquelle on cherche à authentifier le locuteur par l'analyse de son empreinte vocale.

L'utilisation de la voix pour communiquer avec une machine présente plusieurs avantages. Elle s'impose dans le cas où les autres modalités de communication de l'utilisateur sont occupées. Par exemple dans le cockpit d'un avion de chasse, un pilote pourra utiliser sa voix pour marquer une position [43]. Dans le cadre de l'accessibilité et de la prise en compte d'un handicap, le mode vocal permet de rendre accessible, aux personnes non-voyantes, les écrans d'ordinateur ou le contenu des bibliothèques. Pour l'utilisateur souhaitant accéder à distance à un système, le mode vocal permet

d'interagir à distance de manière directe, dans une maison par exemple, ou de manière médiatisée, par un accès téléphonique.

I.5.2 Interaction verbal ou sonore [93]

Au-delà du geste, l'interaction basée sur le son est elle aussi une autre source de variabilité dans la conception des interfaces contemporaines.

Tout d'abord, la reconnaissance de la parole a ses limites (du fait de l'accent des personnes, de leurs langues, de leur culture, de leur vitesse d'élocution, etc.), qui rendent la reconnaissance de la parole difficile. Les taux de reconnaissance actuels sont néanmoins satisfaisants, en témoigne la commercialisation de systèmes dédiés à ce type de traitement. La difficulté réside plus dans le sens à attribuer aux mots reconnus. Pour interpréter le sens d'une phrase, il convient de doter les systèmes de capacités intelligentes pour capturer la sémantique d'une phrase. Cette pratique n'est pas toujours évidente, puisque une communication entre deux personnes implique d'autres éléments que la parole. Dans cette perspective, un domaine de recherche s'est particulièrement développé : l'interaction émotionnelle.

Ces travaux combinent plusieurs techniques de suivi afin d'établir l'état émotionnel d'un utilisateur. Les éléments à analyser peuvent être la position du corps, les expressions faciales, les gestes, les paroles ou encore certaines caractéristiques de la parole.

I.5.3 Interaction haptique [93]

Un système haptique qui fait référence au touché se décompose en deux catégories de point de vue interface : (1) les interfaces à retour d'effort (ou interfaces kinesthésiques) qui permettent de ressentir la position et les mouvements, les forces exercées (collisions, poids, viscosité) à l'aide de capteurs proprioceptifs situés dans les muscles et les tendons, (2) les interfaces tactiles qui permettent de ressentir la forme, la texture ou la température des objets à l'aide de différents types de capteurs situés au niveau de la peau.

En pratique, les systèmes haptiques trouvent leur utilisation dans divers aspects : simulations de sensations réalistes, interactions avec des objets, des milieux (sculpture, découpage, palpation, etc.). Les interactions haptiques peuvent être aussi évoluées dans un environnement virtuel. Selon la description donnée dans [45], quatre (4) tâches peuvent être réalisées : contrôle d'applications, sélection d'objets, manipulation d'objets, navigation, auquel s'ajoutent deux autres tâches : la visualisation (extraire une information) et la communication (transmettre une information).

I.5.4 Interaction multimodale [65]

L'interaction multimodale se caractérise par l'utilisation de plusieurs modes, comme par exemple la voix, le geste ou le mode graphique, pour accéder à un service ou utiliser un logiciel.

Telles que les définissent Yacine Bellik, Daniel Teil, Laurence Nigay et Jölle Coutaz au début des années 90 [24], [132], les modes font références aux sens humains et véhiculent les intentions de l'utilisateur. Une application multimodale fait intervenir plusieurs modes.

2. Les services web

2.1 Concepts et définitions

Un service web est un programme informatique de la famille des technologies web permettant la communication et l'échange de données entre applications et systèmes hétérogènes dans des environnements distribués. Il s'agit donc d'un ensemble de fonctionnalités exposées sur internet ou sur intranet, par et pour des applications ou machines, sans intervention humaine, de manière synchrone ou asynchrone [189].

Dans ce cadre, le protocole de communication est défini dans le cadre de la norme SOAP (*Simple Object Access Protocol*) dans la signature du service exposé en WSDL (*Web Services Description Language*).

Le protocole SOAP repose entièrement sur le langage de description XML (*Extensible Markup Language*). Son objectif est de définir la structure générale des messages échangés entre les composants Web Services. Il s'agit d'un protocole peu restrictif, qui laisse aux composants Web Services le soin de définir comment ils formateront le contenu du message.

Le protocole SOAP permet la transmission de messages entre objets distants. En effet, il autorise un objet à invoquer des méthodes d'objets physiquement situés sur un autre serveur. Le transfert se fait le plus souvent à l'aide du protocole HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).

Le protocole SOAP est composé de deux parties :

- une enveloppe, contenant des informations sur le message lui-même afin de permettre son acheminement et son traitement,
- un modèle de données, définissant le format du message, c'est-à-dire les informations à transmettre.

D'autre part, WSDL est une grammaire XML permettant de décrire un service web. En effet, le WSDL décrit une Interface publique d'accès à un Service Web, notamment dans le cadre d'architectures de type SOA (*Service Oriented Architecture*). C'est une description fondée sur la description XML qui indique comment communiquer pour utiliser le service ;

Le WSDL sert à décrire le protocole de communication SOAP, le format de messages requis pour communiquer avec un service, les méthodes que le client peut invoquer et la localisation d'un service.

En résumé, le fonctionnement d'un service web peut s'effectuer de la manière suivante :

Un acteur consomme des services web en envoyant un fichier SOAP. Les services sont décrits sous forme de fichiers de format WSDL et ensuite distribués à travers un registre UDDI (*Universal Description Discovery and Integration*). Ceci permet un accès facile aux ressources locales et distantes et permet également une coopération et/ou collaboration entre plusieurs acteurs.

2.2 Utilisation des services web pour l'échange de données numériques (ex. objets virtuels)

L'échange de données, particulièrement les données 2D/3D, dans la plateforme distribuée "ARIMA" implémentée dans notre laboratoire est basé sur les services web. Si nous supposons qu'un technicien, muni d'un dispositif mobile (exemple : smartphone), communique avec un expert distant muni d'un Pc-Portable, l'échange de données via les services web peut s'effectuer de la manière suivante :

Le smartphone du technicien capture une vidéo de la scène qui est composée d'un équipement sur lequel des marqueurs sont collés. Pour chaque image capturée, le module de suivi i-Artoolkit détecte les marqueurs et calcule la matrice de transformation "camera-marqueur" pour chaque marqueur. La vidéo capturée et les matrices de transformation sont transmises à l'expert distant via le serveur web. L'expert qui visualise la même vidéo de la scène que le technicien, ajoute des objets virtuels décrivant un diagnostic, des procédures, etc, sur cette vidéo se trouvant à son niveau. Les objets virtuels insérés et leurs positions sont, ensuite, envoyés au technicien. Les objets virtuels sont reçus et affichés dans leurs positions déjà affectées par l'expert distant. Le transfert de données est basé sur une architecture client/serveur. Chaque utilisateur doit s'authentifier auprès du système.

En effet, l'envoi de la vidéo et des matrices de transformation calculées depuis le smartphone du technicien s'effectuent par la méthode "Send (image, matrices de transformation)" exécutée au niveau du serveur web. Au niveau du poste de l'expert, la méthode "Receive (image, marqueurs)" est exécutée. Elle sert à récupérer la vidéo capturée et les matrices de transformations calculées. Les modèles des objets virtuels sont ensuite ajoutés par l'expert distant. Ce dernier envoie la vidéo augmentée au technicien et ceci une fois la méthode "SendObject (objectPosition, Object)" est exécutée. La méthode web "ReceiveObject (objectPosition, Object)" est enfin exécutée permettant de recevoir et d'afficher les objets virtuels au niveau du smartphone.

3. Quelques exemples de systèmes interactifs mixtes

Nous présentons dans le deuxième volet de l'annexe A quelques projets et applications récentes de systèmes interactifs mixtes. Nous exposons, dans ce cadre, quelques systèmes interactifs que nous avons développés dans notre laboratoire.

3.1 Tableau de bord interactif d'Airbus A350

Afin d'alléger la charge cognitive pour chaque tâche des pilotes d'avion, l'entreprise "Airbus" tente de développer des cockpits interactifs de dernière génération pour remplacer les cockpits traditionnels qui sont trop chargés par les points d'interaction traditionnels (bras, boutons, etc.), cf. figure A.1(a). En comparaison avec un cockpit du Concorde, les nouveaux cockpits permettent de réduire les erreurs de manipulation et d'interprétation des informations de bord en limitant les objets d'interaction [93] (cf. figure A.1(b)).

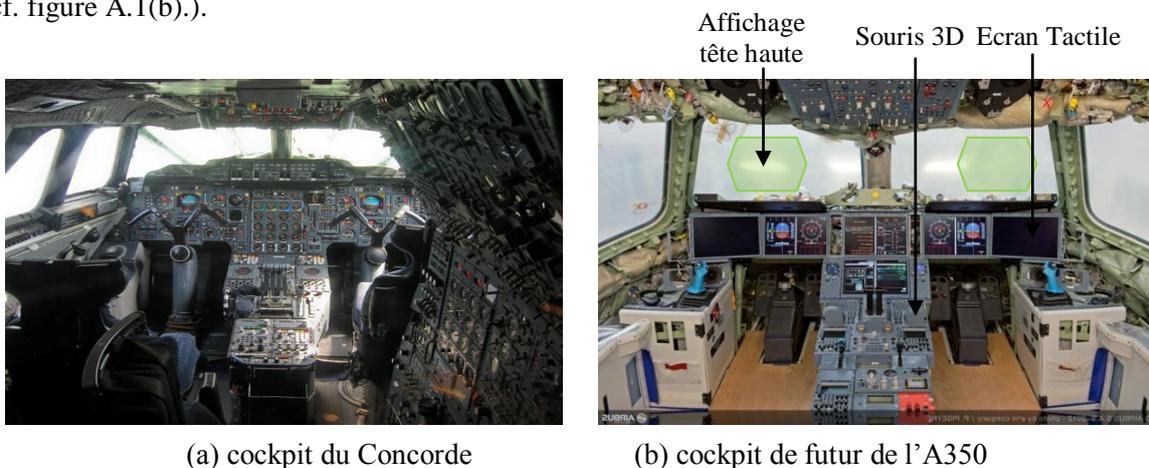


Figure A.1. Cockpits des avions.

3.2 Vitrine interactive

Equipé à l'été 2006, un magasin de Sony à Paris propose une large vitrine interactive [Digi_sony]. L'utilisateur peut circuler dans le catalogue directement relié au système d'information du magasin pour afficher les prix ainsi que la disponibilité d'un produit et feuilleter avec la main (cf. Figure A.2).



Figure A.2. Vitrine interactive de découverte des produits (magasin de Sony à Paris).

Dans le cadre de la mise en œuvre de la plateforme de e-maintenance « ARIMA » de l'équipe VAANIM au niveau de notre laboratoire (Division Robotique et Productique), un prototype de table interactive a été développé. En effet, nous avons réalisé une table interactive basée sur l'utilisation de marqueurs de i'ARToolkit [28] et une autre table basée sur la reconnaissance de gestes de la main [22] (cf. Figure A.3).

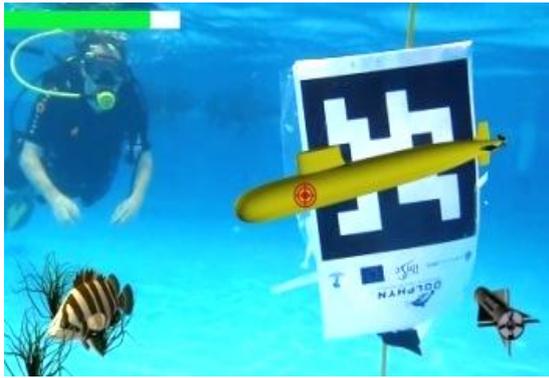


a. Table interactive avec marqueurs b. Table interactive basée sur les gestes de la main

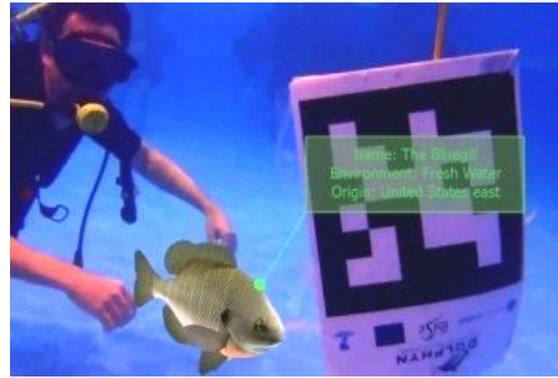
Figure A.3. Prototypes de tables interactives développés au CDTA.

3.3 Réalité mixte en milieux déformables ou dynamiques

L'avancée des technologies a même permis de développer des applications de réalité mixte en milieu marin tel que le prototype réalisé dans [21] et [23] dans le cadre du projet « Digital Ocean » [138], [Digi_ocean]. L'objectif été d'introduire la réalité mixte pour réaliser des activités de loisir aquatique comme les jeux éducatifs et les annotations. Nous avons développé une application interactive (cf. Figure A.4) en utilisant le dispositif mobile « Dolphin » [21], [23] doté d'une caméra et d'un Joystick intégrés. Ce dispositif peut être utilisé sous l'eau ou sur sa surface. Des scénarii de jeux ont été implémentés visant à augmenter la vidéo de la scène réelle sous marine par des objets virtuels (poissons 3D, plantes 3D, textes descriptifs 2D/3D, etc.). Des animations ont été attribuées aux différents objets virtuels. Des marqueurs d'ARToolkitPlus ont été utilisés comme moyen pour assurer le recalage et le suivi des objets virtuels par rapport à la scène réelle sous marine.



a. Jeu sous marin



b. Jeu éducatif

Figure. A.4. Application de la réalité mixte sous l'eau.

3.4 Systèmes interactifs tangibles

Plusieurs recherches ont allé plus loin dans la définition des systèmes de réalité mixte [64]. Elles se basent en premier lieu sur la combinaison de deux mondes réel et virtuel. Il s'agit d'attribuer des formes physiques à des objets virtuels de l'interface utilisateur. Ces nouvelles interfaces utilisent des objets physiques, appelés "bricks", qui se présentent comme des dispositifs d'entrée. Les "bricks" peuvent être étroitement couplés ou attachés à des objets virtuels pour les manipuler ou pour exprimer une action [64]. La figure A.5 montre des exemples d'interfaces tangibles, « Illuminating Clay » et « SandScape » [109], qui permettent à l'utilisateur de manipuler de l'argile ou du sable représentant un modèle géographique. Des informations géographiques sont projetées sur le paysage modifié.

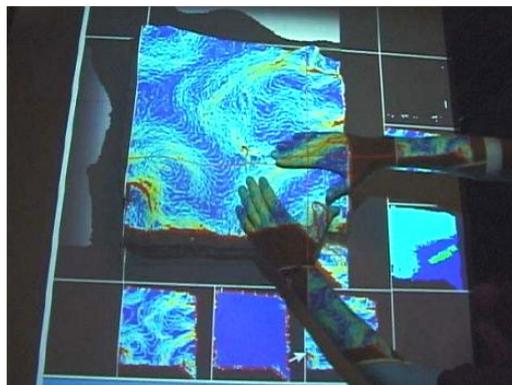


Figure A.5. Exemple d'interface tangible : application « Illuminating Clay ».

3.5 Systèmes interactifs mixtes mobiles

Actuellement, des applications interactives riches sont disponibles au niveau des dispositifs mobiles tels que les smartphones et les casques de visualisation HMD. Munis d'accès réseaux haut débit, de dispositifs de capture vidéo, d'affichage haute résolution, ou encore de capteurs comme des accéléromètres ou des gyroscopes, chaque appareil mobile constitue une plateforme pour le déploiement d'applications interactives.

Comme illustré dans la figure A.6(a), l'utilisateur emploie un iPhone pour visualiser des informations le long de son parcours dans une ville [RA_mobile]. La figure A.6(b) montre une application de géo-localisation [93] (Projet Théorie M : www.theoriem.net) montrant une carte d'emplacement de l'utilisateur se trouvant dans une ville donnée.



a. Visite guidée.



b. Application de géo-localisation.

Figure A.6. Interface interactive sur dispositifs mobiles.

3.6 Systèmes interactifs mixtes collaboratifs

Plusieurs projets ont été réalisés afin de développer des prototypes et des plateformes de systèmes interactifs mixtes collaboratifs [27].

Annexe B

1. Diagrammes simplifiés de la phase de spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction

1.1 Spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction (cf. Section III.4.2)

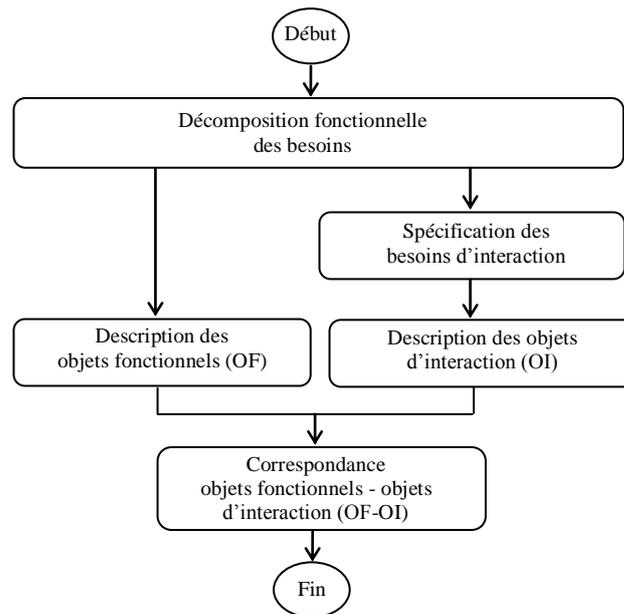


Figure B.1 Diagramme décrivant la phase de spécification des besoins fonctionnels et des besoins d'interaction.

1.2 Spécifications des besoins fonctionnels (cf. Section III.4.2.1)

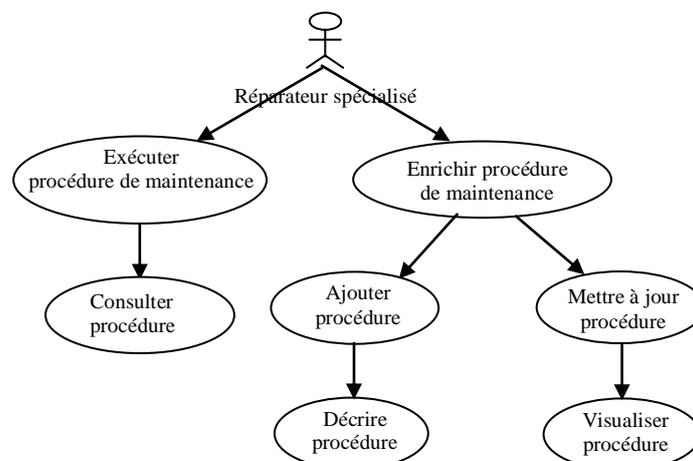


Figure B.2 Décomposition fonctionnelle du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".

1.3 Spécification des besoins d'interaction (cf. Section III.4.2.2)

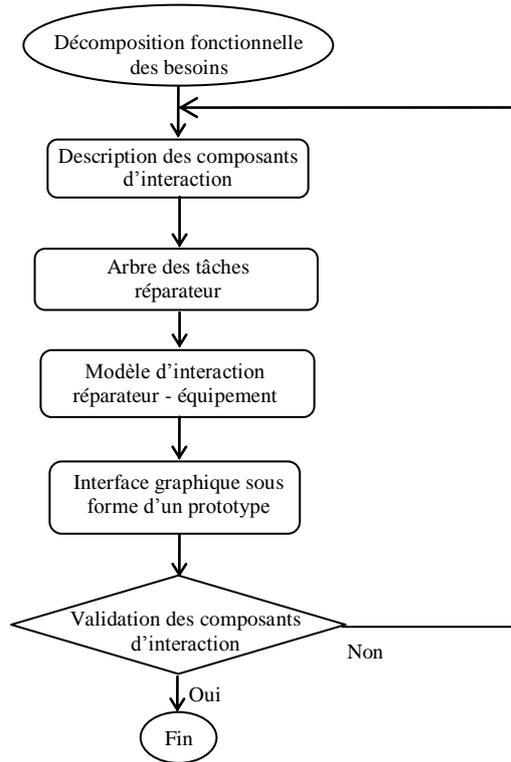


Figure B.3 Organigramme de la phase de spécification des besoins d'interaction.

1.4 Extension des cas d'utilisation (cf. Section III.4.2.2)

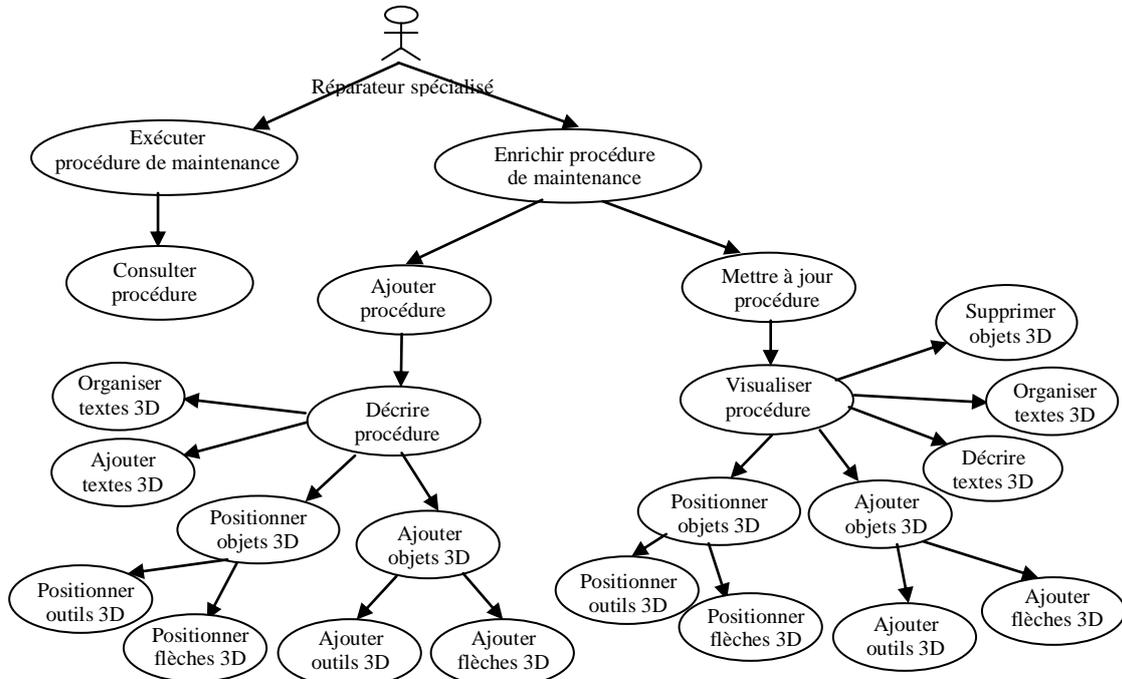


Figure B.4 Evolution du processus métier "gestion d'une procédure de maintenance".

2. Evolution de la méthode 2TUP en termes de processus et modèles

Nous avons décrit dans la section III.3 du chapitre 3 les principes fondamentaux de notre méthode de développement des systèmes de réalité mixte. Ceux-ci ont été intégrés dans la méthode 2TUP. Nous avons, ainsi, proposé la méthode 2TUP étendue. Les phases affectées par cette intégration sont : spécification des besoins, analyse, conception et implémentation. Nous présentons dans les tableaux B.1et B.2 une étude comparative des caractéristiques de la méthode 2TUP étendue avec la méthode 2TUP originale.

Tableau B.1. Comparaison entre les deux méthodes en termes de processus

Tableau B.1(a). Méthode 2TUP originale

	Spécialiste impliqué	Développement de l'Interaction et de l'Interface Homme-Machine	Activité de collaboration entre spécialistes
Phase spécification	Experts métier et GL		
Phase analyse	Expert GL		
Phase conception	Expert GL	Expert GL	
Implémentation	Développeur		

Tableau B.1(b). Méthode 2TUP étendue

	Spécialiste impliqué	Développement de l'Interaction et de l'Interface Homme-Machine	Activité de collaboration entre spécialistes
Phase spécification	Experts métier, GL, IHM et Programmeur d'Interfaces	Expert IHM et Programmeur d'Interfaces	- Métier et GL - IHM et Programmeur d'Interfaces - GL et IHM - Tous les spécialistes
Phase analyse	Experts GL et IHM	Expert IHM et Programmeur d'Interfaces	GL, IHM et Programmeur d'Interfaces
Phase conception	Experts GL et IHM	Expert IHM et Programmeur d'Interfaces	GL, IHM et Programmeur d'Interfaces
Implémentation	Développeur et Programmeur d'Interfaces	Développeur et Programmeur d'Interfaces	Développeur et Programmeur d'Interfaces

Tableau B.2. Comparaison entre les deux méthodes en termes de modèles et outils

Tableau B.2(a). Méthode 2TUP originale

	Modélisation Métier/GL	Modélisation Interaction Homme-Machine/ utilisabilité	Mise en correspondance
Model GL	UML		
Model IHM			
Scenario	Cas d'utilisation		
Prototype		Prototype d'interface	

Tableau B.2(b). Méthode 2TUP étendue

	Modélisation Métier/GL	Modélisation Interaction Homme-Machine/ utilisabilité	Mise en correspondance
Model GL	UML, objets métiers	UML, Objets d'interaction	- Relation «décrire» - Diagrammes d'activité
Model IHM		CTT, IRVO	
Scenario	- Cas d'utilisation - Processus métier	Scénarii abstrait et concret	
Prototype	Collaboration entre spécialistes		

3. Opinions de chacun des trois programmeurs à l'issu de l'évaluation de l'effectivité réelle de la méthode

Nous présentons dans cette section, les opinions des trois programmeurs (cf. Tableaux B.3, B.4 et B.5 ci-dessous) pour chacune des propriétés logicielles suivantes : découplage des objets métiers et d'interaction, structurer le code en composants, réutilisabilité des composants et niveau de simplicité des composants. Notons que ces opinions sont issus des implémentations réalisées par les trois programmeurs sur les trois modèles d'architecture suivants: MVC standard, MVC version optimisée et AMF-C (cf. Section III.7.1 du chapitre 3).

Tableau B.3. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture MVC standard)

N°	Question	Programmeurs			Moyenne
		Premier Programmeur	Second Programmeur	Troisième Programmeur	
1	<i>Découplage objets métier - objets d'interaction.</i>	4	5	4	4.33
2	<i>Structurer le code en composants</i>	4	3	3	3.33
3	<i>Réutilisabilité des composants.</i>	4	4	4	4
4	<i>Niveau de simplicité des composants.</i>	3	4	3	3.33

Tableau B.4. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture MVC optimisé)

N°	Question	Programmeurs			Moyenne
		Premier Programmeur	Second Programmeur	Troisième Programmeur	
1	<i>Découplage objets métier - objets d'interaction.</i>	4	5	4	4.33
2	<i>Structurer le code en composants</i>	4	5	4	4.33
3	<i>Réutilisabilité des composants.</i>	4	4	4	4
4	<i>Niveau de simplicité des composants.</i>	4	5	4	4.33

Tableau B.5. Questionnaire pour les trois programmeurs (implémentation basée sur le modèle d'architecture AMF-C)

N°	Question	Programmeurs			Moyenne
		Premier Programmeur	Second Programmeur	Troisième Programmeur	
1	<i>Découplage objets métier - objets d'interaction.</i>	5	5	4	4.66
2	<i>Structurer le code en composants</i>	4	4	4	4
3	<i>Réutilisabilité des composants.</i>	4	5	4	4.33
4	<i>Niveau de simplicité des composants.</i>	4	4	3	3.66

4. Évaluation de la perception de la facilité d'utilisation de la méthode 2TUP étendue (suite)

Nous avons adressé des questions supplémentaires à l'ensemble des participants afin d'évaluer certains modèles de la méthode proposée. Ces questions concernent principalement l'évaluation des scénarii et des modèles de tâches CTT. Ainsi, nous avons complété le questionnaire présenté dans le tableau 3.3 (cf. Section III.7.2 du chapitre 3) par le questionnaire donné dans le tableau B.6 ci-dessous.

Tableau B.6. Questionnaire supplémentaire pour les programmeurs

N°	Question	Evaluateurs								Moyenne
		Métier et GL				IHM				
1	La représentation fondée sur les scénarii est facile à utiliser.	4	4	4	4	4	4	4	5	4.125
2	La représentation CTT est facile à apprendre et à utiliser.	4	5	5	4	5	5	4	4	4.5
3	La représentation CTT décrit la hiérarchie des actions de manière appropriée.	4	5	5	4	5	5	4	4	4.5
4	Le niveau d'abstraction du modèle CTT est suffisant pour modéliser le séquençement des tâches.	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	Le langage UML modélise l'organisation des processus métier.	4	4	5	5	4	4	4	4	4.25

D'après les évaluateurs, les artefacts tels que les scénarii et les modèles CTT sont à la fois facile à prendre en main et à utiliser (tous les spécialistes sont satisfaits, cf. Questions 1 et 2 du tableau B.6). En outre, ces artefacts fournissent des résultats pertinents concernant la description de l'activité de l'utilisateur dans l'évolution du processus métier (cf. Question 3 du tableau B.6). Les participants estiment aussi que les diagrammes CTT fournissent un niveau d'abstraction approprié pour la modélisation des tâches à partir des scénarii (cf. Question 4 du tableau B.6).

Annexe C

1. Calcul des taux de reconnaissance pour des marqueurs de tailles de 20 mm, 30 mm, 60 mm, 80 mm et 100 mm.

Nous avons présenté dans la section IV.3.1.4 du chapitre 4 l'évolution du taux de reconnaissance du marqueur de taille $d=40$ mm (marquer N°3). De la même manière, nous avons déterminé expérimentalement les taux de reconnaissance des marqueurs suivants : (marquer N°1, $d = 20$ mm), (marquer N°2, $d = 30$ mm), (marquer N°4, $d = 60$ mm), (marquer N°5, $d = 80$ mm) et (marquer N°6, $d = 100$ mm). Les tableaux C.1, C.2, C.3, C.4 et C.5 représentent l'évolution de ces taux de reconnaissance. Notons que les valeurs en gras dans ces tableaux représentent les taux de reconnaissance avec des valeurs supérieures ou égal à 0,8.

Tableau C.1. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°1, $d= 20$ mm.

Angle de rotation (degré)	Distance entre la camera et le marqueur (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,938	0,806	0,585	0,415	0,288	0,181	0,117	0,074	0,061	0,052	0,039	0,018
75	0,891	0,630	0,597	0,401	0,266	0,168	0,137	0,068	0,057	0,048	0,032	0,014
60	0,886	0,516	0,479	0,362	0,144	0,109	0,074	0,052	0,039	0,022	0,017	0,003
45	0,840	0,513	0,352	0,392	0,128	0,100	0,061	0,040	0,031	0,018	0,012	0,001
30	0,819	0,415	0,336	0,141	0,107	0,070	0,040	0,030	0,015	0	0	0
15	0,809	0,408	0,228	0,141	0,101	0,070	0,030	0,028	0,014	0	0	0
5	0,803	0,401	0,195	0,112	0,085	0,063	0,020	0,01	0	0	0	0

Tableau C.2. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°2, $d= 30$ mm.

Angle de rotation (degré)	Distance entre la camera et le marqueur (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,907	0,870	0,843	0,675	0,547	0,423	0,392	0,294	0,243	0,194	0,090	0,048
75	0,879	0,852	0,812	0,662	0,513	0,394	0,358	0,257	0,221	0,185	0,080	0,041
60	0,861	0,848	0,787	0,551	0,467	0,364	0,338	0,261	0,209	0,170	0,073	0,036
45	0,859	0,813	0,776	0,644	0,449	0,335	0,327	0,249	0,174	0,154	0,071	0,029
30	0,840	0,805	0,722	0,595	0,378	0,305	0,274	0,218	0,154	0,140	0,062	0,021
15	0,831	0,582	0,451	0,379	0,227	0,217	0,194	0,158	0,134	0,090	0,041	0,016
5	0,813	0,549	0,416	0,336	0,219	0,165	0,107	0,090	0,076	0,043	0,016	0,009

Tableau C.3. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°4, $d= 60 \text{ mm}$.

Angle de rotation (degré)	Distance entre la camera et le marqueur (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,930	0,890	0,887	0,865	0,806	0,729	0,667	0,657	0,497	0,331	0,274	0,241
75	0,927	0,880	0,876	0,843	0,781	0,751	0,657	0,544	0,463	0,320	0,265	0,232
60	0,924	0,871	0,863	0,821	0,724	0,687	0,647	0,461	0,423	0,315	0,243	0,220
45	0,906	0,859	0,853	0,809	0,718	0,629	0,612	0,447	0,349	0,307	0,227	0,207
30	0,871	0,840	0,832	0,758	0,642	0,591	0,521	0,420	0,330	0,291	0,209	0,196
15	0,842	0,824	0,810	0,644	0,463	0,273	0,249	0,167	0,117	0,070	0,040	0,020
5	0,821	0,807	0,775	0,491	0,417	0,266	0,243	0,146	0,070	0,032	0,012	0,000

Tableau C.4. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°5, $d= 80 \text{ mm}$.

Angle de rotation (degré)	Distance entre la camera et le marqueur (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,920	0,904	0,891	0,870	0,855	0,830	0,814	0,777	0,693	0,656	0,585	0,659
75	0,910	0,895	0,876	0,860	0,841	0,821	0,790	0,750	0,681	0,607	0,549	0,601
60	0,899	0,886	0,865	0,849	0,834	0,814	0,778	0,718	0,673	0,526	0,600	0,510
45	0,890	0,881	0,859	0,831	0,822	0,790	0,765	0,704	0,658	0,504	0,554	0,459
30	0,881	0,870	0,843	0,822	0,809	0,785	0,749	0,717	0,507	0,484	0,313	0,336
15	0,872	0,849	0,826	0,808	0,789	0,701	0,690	0,513	0,485	0,342	0,279	0,231
5	0,842	0,831	0,803	0,723	0,570	0,420	0,390	0,350	0,280	0,260	0,220	0,160

Tableau C.5. Taux de reconnaissance pour le marqueur N°6, $d= 100 \text{ mm}$.

Angle de rotation (degré)	Distance entre la camera et le marqueur (mm)											
	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
90	0,943	0,914	0,903	0,898	0,863	0,846	0,824	0,807	0,713	0,707	0,654	0,642
75	0,941	0,914	0,892	0,869	0,856	0,814	0,803	0,749	0,702	0,670	0,614	0,595
60	0,917	0,899	0,881	0,864	0,843	0,809	0,762	0,728	0,681	0,648	0,592	0,561
45	0,877	0,866	0,850	0,839	0,826	0,801	0,731	0,656	0,622	0,573	0,492	0,432
30	0,848	0,839	0,825	0,819	0,803	0,765	0,632	0,589	0,476	0,456	0,397	0,367
15	0,839	0,831	0,817	0,811	0,774	0,698	0,606	0,582	0,468	0,463	0,341	0,333
5	0,813	0,820	0,811	0,807	0,620	0,478	0,416	0,366	0,262	0,211	0,163	0,121

2. Critères d'utilisabilité

L'expérimentation présentée dans la section IV.5.2 du chapitre 4 concerne l'évaluation des interfaces que nous avons proposées. En se basant sur le principe d'utilisabilité présenté dans [84], nous avons défini quatre critères d'utilisabilité (nous avons étudié les deux premiers dans le cadre de nos expérimentations).

- Facilité d'utilisation (*Ease of use*) : le système interactif doit être facile d'usage et intuitif.
- Acceptation par l'utilisateur (*Acceptance by the user*) : l'interface du système doit être satisfaisante pour le technicien et l'expert.
- Effectivité (*Effectiveness*) : le système doit permettre d'obtenir des résultats significativement meilleurs pour l'équipement à maintenir.
- Sécurité (*Safety*) : le fonctionnement du système doit être garanti sans risque pour l'équipement et les membres de l'équipe de maintenance.

3. Evaluation expérimentale des systèmes d'aide développés (suite)

Nous présentons, dans cette section, d'une façon plus détaillée les résultats des expérimentations décrits dans les figures 4.38 et 4.39 (cf. Section IV.5.3 du chapitre 4).

La figure 4.38 décrit la moyenne des taux de réussite des huit sujets pour la réalisation d'une tâche de maintenance. Le tableau C.6 représente le taux de réussite évalués par chacun des huit sujets pour les cinq modalités.

Tableau C.6. Avis des huit sujets (évaluer le taux de réussite d'une tâche)

Modalité	Sujet N°1	Sujet N°2	Sujet N°3	Sujet N°4	Sujet N°5	Sujet N°6	Sujet N°7	Sujet N°8	Moyenne
1. Réaliser la tâche sans documentation	15%	10%	30%	20%	40%	60%	35%	50%	32,50%
2. Réaliser la tâche en utilisant la documentation	60%	30%	50%	50%	50%	60%	55%	65%	52,50%
3. Réaliser la tâche en utilisant une interface classique	50%	40%	60%	60%	60%	70%	65%	80%	60,625%
4. Réaliser la tâche en utilisant un système interactif mixte avec un smartphone	80%	90%	85%	90%	75%	80%	85%	90%	84,375 %
5. Réaliser la tâche en utilisant un système interactif mixte avec un casque HMD	90%	85%	90%	80%	70%	75%	90%	80%	82,50%

Le tableau C.7 explique plus en détail les résultats décrits dans la figure 4.39 en représentant la distribution des avis des sujets concernant l'évaluation de la difficulté de réaliser une tâche.

Tableau C.7. Répartition des avis des sujets (évaluer la difficulté de réaliser une tâche)

Modalité	Très Facile	Facile	Moyen	Difficile	Très difficile
1. Réaliser la tâche sans documentation			Sujet N°6	Sujet N°5 Sujet N°7	Sujet N°1 Sujet N°2 Sujet N°3 Sujet N°8 Sujet N°4
2. Réaliser la tâche en utilisant la documentation		Sujet N°1 Sujet N°6	Sujet N°2 Sujet N°7 Sujet N°8 Sujet N°4	Sujet N°3 Sujet N°5	
3. Réaliser la tâche en utilisant une interface classique		Sujet N°6 Sujet N°8	Sujet N°1 Sujet N°2 Sujet N°3 Sujet N°5 Sujet N°7 Sujet N°4		
4. Réaliser la tâche en utilisant un système interactif mixte avec un smartphone	Sujet N°2 Sujet N°4 Sujet N°8	Sujet N°1 Sujet N°3 Sujet N°5 Sujet N°6 Sujet N°7			
5. Réaliser la tâche en utilisant un système interactif mixte avec un casque HMD	Sujet N°1 Sujet N°3 Sujet N°7	Sujet N°2 Sujet N°4 Sujet N°5 Sujet N°6 Sujet N°8			

Annexe D

Les figures ci-dessous représentent une description de quelques composants du moteur de Peugeot 206. Nous avons placé des marqueurs de i-ARToolkit de différentes tailles dans plusieurs endroits du moteur afin de concevoir et expérimenter les interfaces interactives d'aide à la maintenance que nous avons développées. Le choix des marqueurs a été effectué sur la base de l'étude réalisée dans la section IV.3.1.4 du chapitre 4.

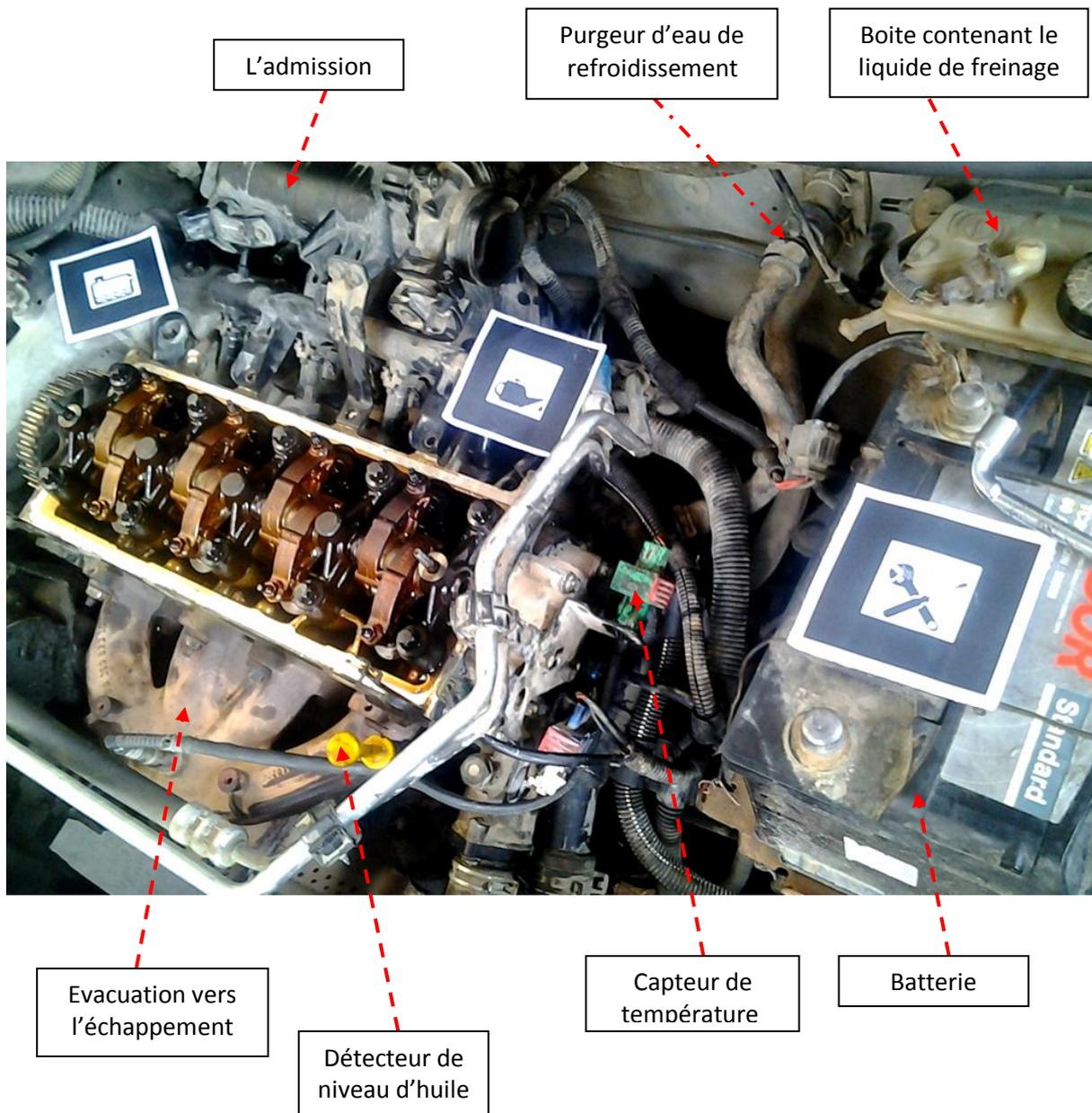


Figure D.1 Marqueurs de i-ARToolkit collés sur les composants du moteur de Peugeot 206.

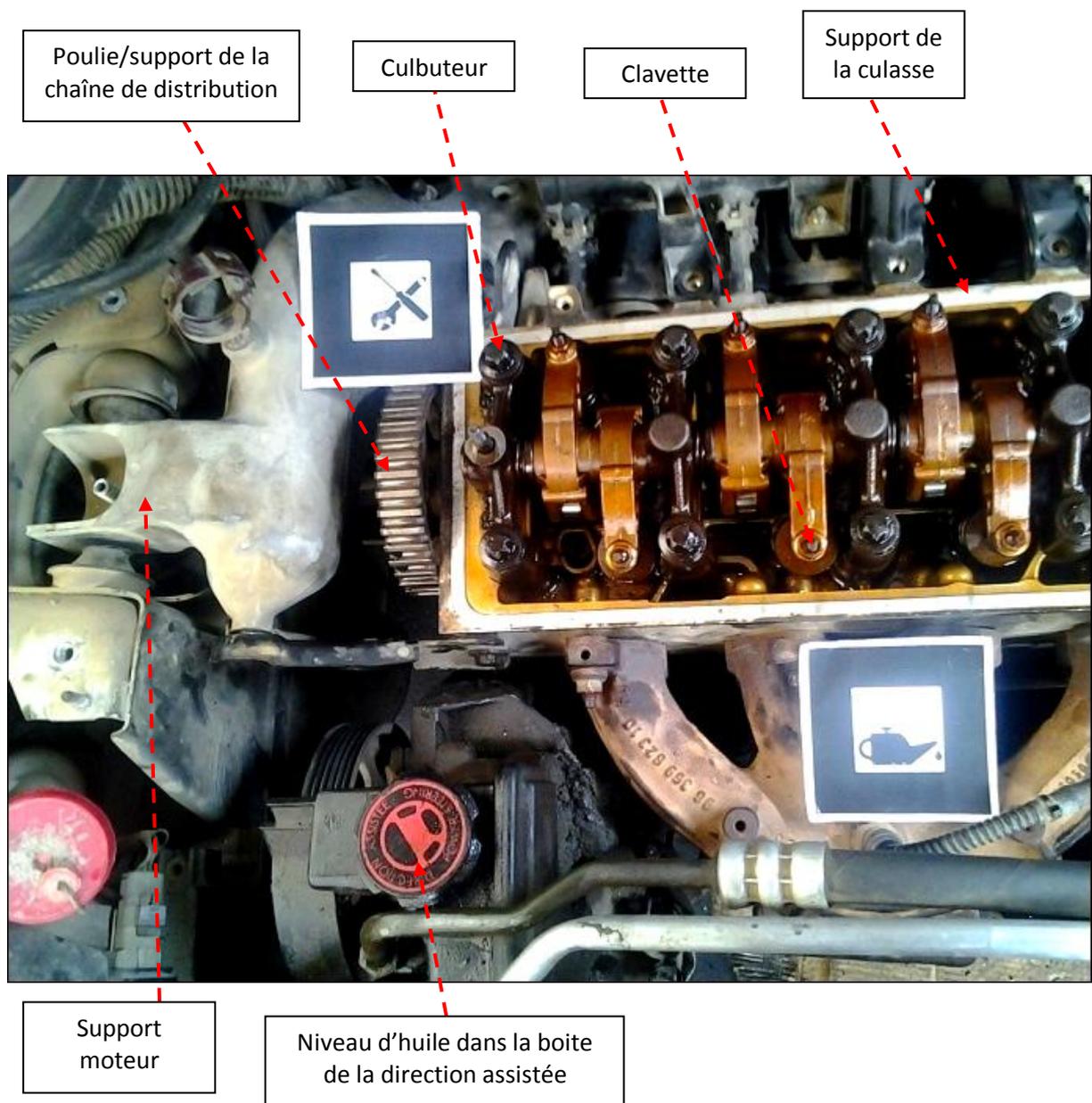


Figure D.2 Marqueurs de i-ARToolkit collés sur des composants attachés à la culasse.

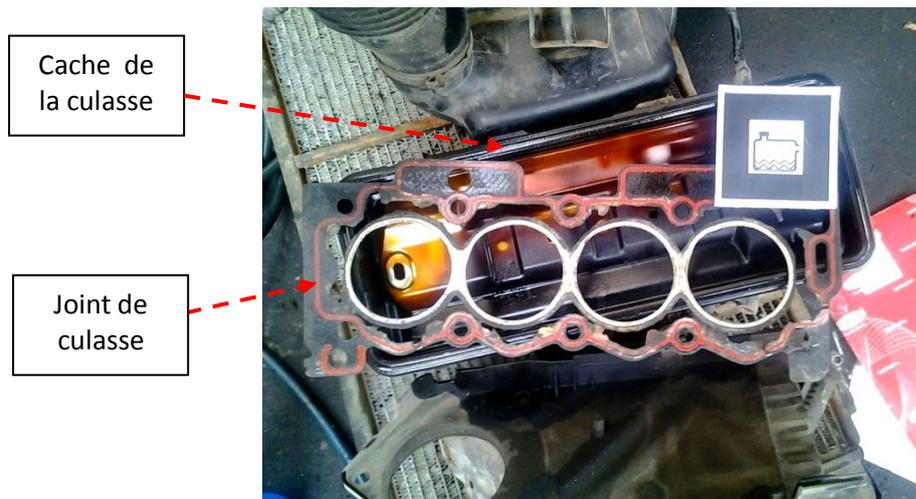


Figure D.3 Quelques composants de la culasse.

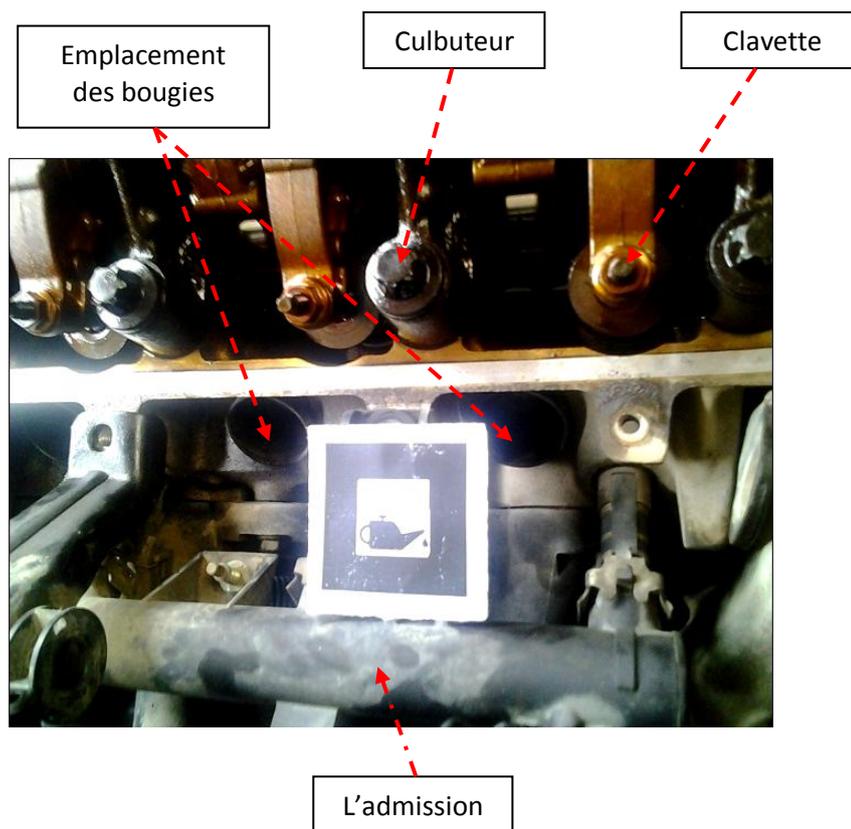


Figure D.4 Emplacement des bougies.

Production scientifique

Publications (deux revues scientifiques et un chapitre de livre)

- 2013
- ✚ **Benbelkacem, S.**, Belhocine, M., Zenati-Henda, N., Bellarbi, A., Tadjine, M., “Integrating HCI and Business Practices for Mixed Reality Systems Design: a Case Study”, IET Software, vol. 7, pp. 1-16, September, 2013 (**IF = 0,658**).
 - ✚ **Benbelkacem, S.**, Belhocine, M., Bellarbi, A., Zenati-Henda, N., Tadjine, M., “Augmented reality for photovoltaic pumping systems maintenance tasks”. Renewable Energy, Elsevier, vol. 55, pp. 428-437, July, 2013 (**IF= 2,989**).
- 2011
- ✚ **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Zerarga, F., Bellarbi, A., Belhocine, M., Malek S., and Tadjine, M., “Augmented Reality Platform for Collaborative E-Maintenance Systems”, in Andrew Yeh Ching Nee – InTech, Book Chapter, Edition: ‘Augmented Reality - Some Emerging Application Areas’, pp. 211–226, December, 2011.

Communications (conférences internationales et nationales)

- 2013
- ✚ Bellarbi, A., Domingues, C., Otmane, S., **Benbelkacem, S.**, Dinis, A., “Augmented Reality for Underwater activities with the Use of the DOLPHYN”, 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC’13), Paris-Evry, pp. 409 – 412, 2013.
 - ✚ Bellarbi, A., Belghit, H., **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., “Hand Gesture Recognition Using Contour based Method for Tabletop Surfaces”, 10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC’13), Paris-Evry, pp. 832 - 836, 2013.
- 2012
- ✚ **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., “Interactive Space for Management of Documents in a Maintenance Context”, 3rd IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS’12), Tangier, Morocco, pp 378 – 383, 2012.
 - ✚ Belghit, H., Zenati-Henda, N., Bellarbi, A., **Benbelkacem, S.**, Belhocine, M., “Tracking Color marker using projective transformation for augmented reality application”, 3rd IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS’12), Tangier, Morocco, 2012, pp 372 – 377.
 - ✚ **Benbelkacem, S.**, Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., “HCI Knowledge in Software Engineering Practices for Designing Interactive Maintenance Assistance Systems”, 36th IEEE International Conference on Computer Software and Applications (COMPSAC’12), Izmir, Turkey, pp.362-363, 2012 (**Ranking B**).
 - ✚ Bellarbi, A., Domingues, C., Otmane, S., **Benbelkacem, S.**, Dinis, A., “Underwater Augmented Reality Game using the DOLPHYN”, The 18th ACM symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST’12), Ontario, Canada, 2012 (**Ranking A**).

2011	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Bellarbi, A., Benbelkacem, S., Zenati-Henda, N., Belhocine, M., “Hand gesture interaction using color-based method for tabletop interfaces”. 7th IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP’11), Valletta, Malta, pp. 1-6, 2011. ✚ Zérarga, F., Benbelkacem, S., Zenati-Henda, N., “Designing distributed mobile platform for e-maintenance assistance”, International Conference on Automation and Mechatronics (CIAM’11), Oran, Algérie, 2011.
2010	<ul style="list-style-type: none"> ✚ Benbelkacem, S., Zenati-Henda, N., Belhocine, M., Bellarbi, A., Tadjine, M., Malek, S., “Augmented reality platform for solar systems maintenance assistance”, 1st International Symposium on Environment Friendly Energies in Electrical Applications (EFEEA’10), Ghardaia, Algérie, 2010. ✚ Bellarbi, A., Benbelkacem, S., Malek, S., Zenati-Henda, N., Belhocine, M., “Dynamic thresholding technique for ARToolKit recognition markers”, International Conference on Electrical Engineering, Electronics and Automatic (ICEEA’10), Béjaia, Algérie, 2010. ✚ Bellarbi, A., Benbelkacem, S., Malek, S., Zenati-Henda, N., “Amélioration des performances d'ARToolKit pour la réalisation d'applications de réalité augmentée”, 2nd International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA’10), Biskra, Algérie, 2010.