

Contribution à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée pour la maintenance.

Nadia Zenati - Henda

▶ **To cite this version:**

Nadia Zenati - Henda. Contribution à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée pour la maintenance.. Automatique / Robotique. Université de Franche-Comté, 2008. Français. NNT : . tel-00292097

HAL Id: tel-00292097

https://theses.hal.science/tel-00292097

Submitted on 30 Jun 2008

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

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

*Année **: 2008***

THESE

présentée à

L'UFR des Sciences et Techniques
De l'Université de Franche-Comté

Pour obtenir le

GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE

En Automatique
(Ecole doctorale Sciences Physiques pour l'Ingénieur et Microtechniques)

Contribution à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée pour la maintenance

par

Nadia Zenati-Henda

Soutenue *le 18 Juin 2008* devant la commission d'examen *:*

Pierre Borne	**Professeur à l'Ecole Centrale de Lille**	**Président de jury**
Zineb SIMEU-ABAZI	**Maître de conférences à l'université Joseph Fourrier, Grenoble**	**Rapporteur**
Pascal LORENZ	**Professeur à l'Université de Haute Alsace, Colmar**	**Rapporteur**
Hamid Bessalah	**Maître de recherche au Centre de Développement des Technologies Avancées, Alger**	**Examinateur**
Kondo Adjallah,	**Maître de conférences à l'Université de Technologie de Troyes**	**Examinateur**
Noureddine Zerhouni	**Professeur à l'ENSMM de Besançon**	**Directeur de thèse**
Jean-Louis DAUTIN	**Directeur de CLARTE, Laval**	**Invité**
Pascal Bressy	**Responsable du département Exploitation DCNS, Toulon**	**Invité**

Remerciements

Mes travaux de thèse présentés dans ce manuscrit n'auraient jamais pu aboutir sans l'aide et le soutien de nombreuses personnes que je tiens particulièrement à remercier.

Tout d'abord un grand et chaleureux merci à mon directeur de thèse, Noureddine Zerhouni, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécaniques et Microtechniques de Besançon (ENSMM) pour son encadrement, ses conseils et ses encouragements et surtout pour m'avoir fait confiance et fourni une ouverture sur d'autres travaux de recherche.

Je suis également très reconnaissante envers les membres de mon jury de thèse pour le temps qu'ils m'ont consacré. J'en suis honorée. Merci à mes deux rapporteurs, Zineb Simeu-Abazi et Pascal Lorenz, merci à Pierre Borne, président du jury, merci à Kondo Adjallah et Hamid Bessalah, examinateurs.

Mes remerciements vont également aux membres de l'équipe Vision Artificielle et Interprétation d'Images du Centre de Développement des Technologies Avancées d'Alger (CDTA) qui ont su créer et entretenir une ambiance de travail très sympathique.

Je remercie également les membres de l'équipe COSMI du Département Automatique des systèmes Micro-Mecatroniques (AS2M) de FEMTO-ST pour leur soutien et en particulier Brigitte Morello, Kamel Medjaher et Karim Haouchine.

Un remerciement tout particulier à Martine Azema du département de l'ENS2M de Besançon pour son aide.

Un grand Merci également à mes parents et ma famille.

Le dernier mot, tout simplement personnel, est pour Karim pour sa présence à mes cotés, sa patience et sa compréhension, malgré les errances de mon humeur. Merci…

Table des matières

Introduction générale ***12***

Chapitre I La réalité augmentée : état de l'art ***15***

Introduction ***15***

I.1 La réalité augmentée : définitions ***16***

I.2 La réalité virtuelle ***17***

I.2.1 Définitions **17**

I.2.2 De la réalité virtuelle à la réalité augmentée **18**

I.3 Continuum réel virtuel ***19***

I.4 Exemples de systèmes RA ***23***

I.4.1 Applications pour la bureautique **23**
I.4.1.1 Le DigitalDesk [Wel93] 23
I.4.1.2 Applications basées sur Navycam [RN95] 24
I.4.1.3 Audio notebook [Sti96] 24
I.4.1.4 LivePaper [RR01] 25

I.4.2 Applications dans le domaine Médical **26**
I.4.2.1 Casper [Dub01] 26
I.4.2.2 Medarpa (MEDical Augmented Reality for PAtients) [FSA+05] 27
I.4.2.3 Virtual Mirror Box [OPM+03]. 28
I.4.2.4 Ramp (Reality Augmentation for Medical Procedures) [SKV02]. 29

I.4.3 Applications pour la conception **29**
I.4.3.1 Le système Build-IT : Tangible Interaction for collaborative Design [FVB+00] 29
I.4.3.2 SeamlessDesign [KTY 99] 30
I.4.3.3 Le système Ambiente [SPM+02] 31

I.4.4 Applications pour l'architecture et l'urbanisme **32**
I.4.4.1 ARTHUR (Augmented Round Table for Architecture and Urban Planning)[GMS+03] 32
I.4.4.2 Architectural Anatomy [WFM+96]. 32
I.4.4.3 Le système Ariel [Mac98] 33

I.4.5 Les applications pour les jeux **34**
I.4.5.1 Jeu Mah-jongg [SEG98] 34
I.4.5.2 TROC [BNR+02]. 34
I.4.5.3 Le train invisible [WPS05] 35

I.4.6 Applications pour l'archéologie **35**
I.4.6.1 Archeoguide [GD01] 35
I.4.6.2 Magic [RNB04] 36

I.4.7 Applications pour la maintenance **37**
I.4.7.1 KARMA [FMS93] 37
I.4.7.2 Le système ARC (Augmented Reality for Construction) [WFM+96] 38
I.4.7.3 STARMATE [Sch01] 38
I.4.7.4 ARVIKA [Ede02] 39

I.4.7.5 SEAR [GGZ+03] 40
I.4.7.6 AMRA [DRM+05] 41
I.4.8 Autres domaines d'applications 42
I.4.8.1 Le musée augmenté [RN95] 42
I.4.8.2 Arlibrary [RN95] 42
I.5 Synthèse et discussion 43
I.6 Conclusion 45
Chapitre II Modèles pour l'interaction Homme-Machine 47
Introduction 47
II.1 Environnement et développement des systèmes interactifs : les modèles d'interaction 48
II.1.1 Modèle d'interaction de Norman : la théorie d'action de Norman 48
II.1.2 Interaction instrumentale 50
II.1.3 Le modèle DPI (document, présentations, instruments) 51
II.1.4 La théorie de l'activité médiatisée par l'instrument 53
II.1.5 Le modèle d'interaction physique de SATO 53
II.2 Modèles spécifiques aux systèmes basés sur la réalité augmentée 54
II.2.1 Description du formalisme ASUR 54
II.2.2 Le modèle IRVO 57
II.3 Modèles d'architectures logicielles : modèles de références pour les systèmes interactifs 59
II.3.1 Les modèles à couches 60
II.3.1.1 Les principes du modèle de Seeheim 60
II.3.1.2 Le modèle de référence Arch ou Seeheim révisé 61
II.3.2 Les modèles multi-agents 62
II.3.2.1 Le modèle MVC (Model-View-Controller) 63
II.3.2.2 Un agent PAC : un agent à facettes 63
II.3.2.3 Le modèle AMF élémentaire 64
II.3.3 Les modèles hybrides 65
II.3.3.1 Le modèle PAC-Amodeus 65
II.4 Conclusion 69
Chapitre III Outils de conception et de réalisation logicielles de système de réalité augmentée 70
Introduction 70
III.1 Eléments de conception et de réalisation d'un système interactif 71
III.1.1 Le modèle de cycle en cascade 71
III.1.2 Le modèle de cycle en spirale 72
III.1.3 Le modèle de cycle en V 73
III.2 Propriétés ergonomiques d'un système de réalité augmentée 76

III.3 Espace de conception : la conception globale ____ *78*

III.3.1 UML : un modèle d'interaction pour les systèmes de réalité augmentée ____ **78**

III.3.1.1 Diagramme de classes ____ 79

III.3.1.2 Notions utilisés dans le diagramme des classes ____ 79

III.3.1.3 Diagramme des composants ____ 81

III.3.2 Les entités ____ **82**

III.3.3 Modélisation globale de la plate-forme ARIMA ____ **82**

III.3.3 Détail des différentes entités ____ **83**

III.3.4 Le système SVAM ____ **85**

III.3.4.1 Détail des différents paquetages ____ 88

III.3.4 Caractéristiques des composants et des relations ____ 91

III.3.4.1 Caractéristiques des composants ____ 91

III.3.4.2 Caractéristiques des relations ____ 91

III.4 Eléments de réalisation logicielle ____ *93*

III.4.1 Adaptation du modèle PAC-Amodeus aux systèmes de réalité augmentée ____ **93**

III.4.2 Flux d'information dans le modèle adapté ____ **94**

III.5 Application en e-maintenance ____ *96*

III.5.1 Architecture générale ____ **96**

III.5.2 Les modules de communication ____ **98**

III.5.2.1 Le courrier électronique ____ 98

III.5.2.2 Le dialogue en ligne ____ 98

III.5.2.3 Le transfert de fichier en temps réel ____ 99

III.5.3 Diagramme conceptuel d'un système de e-maintenace ____ **99**

III.5.3.1 Schéma logique de la base de données ____ 99

III.6.5 Conception de l'application ____ **101**

III.6.5.1 Acteurs et cas d'utilisation ____ 101

III.7 Conclusion ____ *107*

Chapitre IV Des résultats conceptuels à la réalisation : application au système ARIMA ____ *109*

Introduction ____ *109*

IV.1 Description du projet ARIMA ____ *110*

IV.2 Liens et apport de la réalité augmentée dans un processus de maintenance ____ *111*

IV.2.1 Evaluation ergonomique des systèmes de RA ____ **111**

IV.2.2 Principales conclusions sur l'utilité et l'utilisabilité de la réalité augmentée dans la maintenance ____ **112**

IV.3 Plate-forme matérielle ____ *113*

IV.3.1 Matériels utilisés ____ **113**

IV.3.2 Utilisation de la plate-forme matérielle pour la réalisation de trois techniques d'interaction générales ____ **115**

IV.4 Réalisation logicielle ____ *115*

IV.4.1 Le contrôleur de dialogue CD 116
IV.4.2 Le pilier réel 120
IV.4.3 Le pilier informatique 121
IV.4.3.1 Le NF RAM (Noyau Fonctionnel Réalité Augmentée Maintenance) 122
IV.4.3.2 Le NF SGBD (Noyau Fonctionnel Système de Gestion de Base de Données) 123
IV.5 Traduction des procédures de maintenance sous forme numérique ***124***
IV.5.1 Analyse des besoins 125
IV.5.1 Apports d'une application de réalité augmentée exploitant une procédure de maintenance 125
IV.5.2 Analyse d'une procédure de maintenance 126
IV.5.4 Procédures de maintenance : étude de cas 126
IV.5.6 Procédure de e-maintenance : étude de cas 128
IV.5.6.1 Scénario de e-maintenance : étude de cas 129
IV.6 Conclusion ***133***
Conclusion Générale et Perspectives ***134***
Références Bibliographiques ***138***
ANNEXES ***149***

Table des figures et tables

Figure 1.1. La boucle perception, cognition, action passant par le monde virtuel (selon P.Fuchs [FMA+03] ____ *18*
Figure 1.2. Triangles de la Réalité Augmentée (RA) et de la Réalité Virtuelle ____ *19*
Figure 1.3. Degré de connaissance du monde réel ____ *20*
Figure 1.4.Continuum selon de P.Milgram ____ *21*
Figure 1.5. (a) le digital desk, (b) Dispositif du digital desk ____ *23*
Figure 1.6. Architecture du système Navycam ____ *24*
Figure 1.7. Prototype du système audio notebook ____ *25*
Figure 1.8. Un utilisateur du système LivePaper ____ *25*
Figure 1.9. Application collaborative du système LivePaper ____ *26*
Figure 1.10. Un exemple d'application de Navicam dans le domaine de la musique ____ *26*
Figure 1.11. Organisation du bloc opératoire lors de l'utilisation de CASPER en phase de guidage. ____ *27*
Figure 1.12. Système Medarpa (http://www.medarpa.de) ____ *27*
Figure 1.13. Le dispositif Virtual Mirror ____ *28*
Figure 1.14. Bras virtuel perçu ____ *28*
Figure 1.15. Le système RAMP ____ *29*
Figure 1.16.Vue générale du dispositif Build-IT ____ *30*
Figure 1.17. Vue détaillée d'une interaction avec deux briques ____ *30*
Figure 1.18. Configuration hardware du système SeamlessDesign. (image issue de [KTY 00]). ____ *31*
Figure 1.19. Plusieurs utilisateurs coopérant avec les différents dispositifs du système ____ *31*
Figure 1.20. Utilisateurs du système ARTHUR ____ *32*
Figure 1.21. Visualisation en fil de fer de l'augmentation (image prise de [WFM+ 96]) ____ *33*
Figure 1.22. Dispositif Ariel (image prise de [Mac98]) ____ *33*
Figure 1.23. Le jeu Mah-Jongg (Image prise de [SEG98]) ____ *34*
Figure 1.24. Récupération d'un objet numérique dans un cube physique (image prise de [RNB+04]). ____ *35*
Figure 1.25. (a) Contrôle du train virtuel à partir du PDA, (b) L'aspect collaboratif du jeu ____ *35*
Figure 1.26. Reconstitution d'une ruine grec sur un site archéologique ____ *36*
Figure 1.27.Une copie d'écran de l'interface sur la tablette du système MAGIC, la fenêtre en haut à droite est la vue qui est affichée sur le casque de visualisation semi-transparent (image prise de [RNB+04]) ____ *37*
Figure 1.28. Le système Karma (photo issue de Feiner [FMS93]) ____ *38*
Figure 1.29. Ce que voit l'utilisateur du système ARC à travers son casque de visualisation *38*
Figure 1.30. Le musée augmenté ____ *42*
Figure 1.31. Exemple montrant les coordonnées relatives des livres résultant de la recherche ____ *43*

Tableau 1.1. Différentes classes des dispositifs d'affichage selon Milgram [MK94] ____ *22*

Tableau 1.2. Synthèse de la revue des applications de Réalité augmentée 44
Tableau 1.3. Synthèse de la revue des applications de Réalité augmentée 45

Figure 2. 1. Les sept étapes du modèle de Norman 49
Figure 2. 2. Modèle d'interaction instrumentale 51
Figure 2. 3. Modèle conceptuel de DPI 52
Figure 2. 4. Description ASUR du scénario du musée augmenté ([Dub02]) 56
Figure 2. 5. Les principales entités et leurs relations ([Cha04]) 58
Figure 2. 6. Exemples de modélisations du travail collaborative : a: outils et objets partagés; b: outils et objets propres à chaque utilisateur ([Cha04]) 58
Figure 2. 7. Le modèle de référence de base pour les systèmes interactifs : modèle de Seeheim 60
Figure 2. 8. Les composants du modèle ARCH 62
Figure 2. 9. Le modèle MVC 63
Figure 2. 10. Le modèle PAC 64
Figure 2. 11. Le modèle AMP 65
Figure 2. 12. Le modèle hybride PAC-Amodeus (d'après [Nig94]) 67
Figure 2. 13.Un agent PAC du contrôleur de dialogue. 67

Figure 3. 1. Modèle de cycle de vie en cascade [Roy70] 72
Figure 3. 2. Le modèle de cycle de vie en spirale (image prise de [Boe81]) 73
Figure 3. 3. Mise en relation des étapes du cycle de vie en V du logiciel et les étapes de conception de l'interaction [Nig94] 75
Figure 3. 4. Exemple d'une association binaire 80
Figure 3. 5. Exemple de relation d'agrégation 81
Figure 3. 6. Représentation d'un composant 81
Figure 3. 7. Diagramme global des classes mettant en évidence les différents paquetages de la plate-forme et les relations entre eux. 83
Figure 3. 8. Plate-forme ARIMA détaillant les différents paquetages et les relations entre eux 86
Figure 3. 9. Diagramme global du système SVAM mettant en évidence les différents paquetages et les relations entre eux. 87
Figure 3. 10. Architecture détaillée du système SVAM sous forme de paquetages. 87
Figure 3. 11. Architecture détaillée du système SVAM sous forme de diagramme des classes 90
Figure 3. 12. Adaptation du modèle d'architecture PAC-Amodeus au système de réalité augmentée. 96
Figure 3. 13. Pac-Amodeus pour une application de e-maintenance (application client-serveur) 97
Figure 3. 14. La communication entre les différents sites 99
Figure 3. 15. Schéma de la base de données. 100
Figure 3. 16. Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur. 102
Figure 3. 17. Diagramme de cas d'utilisation de l'administrateur. 102
Figure 3. 18. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « inscription au service » 103
Figure 3. 19. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « accéder au système » 104
Figure 3. 20. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « Lancer l'alarme » 105
Figure 3. 21. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « Envoi les rapports aux expert » 105

Figure 3. 22. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « communication entre l'expert et le réparateur» 106
Figure 3. 23. Diagramme de séquences du cas d'utilisation «Terminer la session». 107

Figure 4. 1. Architecture globale de la Plate-forme ARIMA 111
Figure 4. 2. Position de l'opérateur pendant une des phases de la maintenance 114
Figure 4. 3. Ensemble des pièces composant la plate-forme matérielle. 115
Figure 4. 4. La hiérarchie d'agents PAC peuplant le contrôleur de dialogue du système 117
Figure 4. 5. Agent scénario et ses fils 117
Figure 4. 6. Agent panne et ses fils 117
Figure 4. 7. Architecture PAC-Amodeus du système comprenant le pilier réel et le pilier informatique 121
Figure 4. 8. Le pilier informatique du modèle d'Architecture PAC-Amodeus du système 122
Figure 4. 9. Modèles E/A de la base de données du SGBD du système 124
Figure 4. 10. La fraiseuse numérique « LAGUN » 129
Figure 4. 11. Le message d'erreur affiché 129
Figure 4. 12. Page « Lancer Alarme » dans l'interface réparateur 130
Figure 4. 13. Interface expert 130
Figure 4. 14. Augmentation indiquant au technicien comment couper l'alimentation 131
Figure 4. 15. Exemple d'une augmentation montrant au technicien comment déverrouiller la porte 132
Figure 4. 16. Augmentation indiquant au Technicien les trois fusibles. 132

Je ne pense jamais au futur. Il vient bien assez tôt

— Einstein, Albert

Introduction générale

Nos travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de l'Interaction Homme-Machine (IHM) et portent sur la conception et à la réalisation de systèmes de réalité augmentée dans le contexte particulier de la maintenance.

De nos jours, les travaux dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine (IHM) visent à sortir l'ordinateur de son cadre habituel afin de favoriser l'interaction de l'environnement physique de l'utilisateur, c'est-à-dire le monde réel : on parle ainsi de réalité augmentée (RA).
La RA est un nouveau moyen d'interaction dont l'essence même est de favoriser l'interaction de l'utilisateur avec les deux mondes réel et virtuel. L'objectif principal étant de parvenir à rompre la frontière entre le monde numérique et notre environnement réel et accroître les capacités de l'utilisateur à percevoir les informations et à exécuter des tâches, le tout sans coupure avec son environnement réel.
Actuellement, au sein de la communauté Interaction Homme-Machine, la RA constitue l'un des principaux enjeux parmi les nouveaux paradigmes d'interaction. En parallèle, la RA fait l'objet d'un intérêt grandissant dans son application dans plusieurs domaines de recherche. Chaque domaine d'application adapte la RA à ses besoins et développe ses principes de conception.
Si le concept de la RA est aujourd'hui de plus en plus couramment employé dans les domaines aussi divers que la médecine, les jeux, ou l'architecture, il n'en demeure pas moins que ce thème de recherche est très présent dans la maintenance où il contribue dans l'aide à l'intervention et répond à une demande forte à la fois dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Il permet en particulier de faciliter l'accès aux informations nécessaires à l'opération d'une tâche pour un opérateur de maintenance et d'accroître la disponibilité des machines en optimisant le support technique.
Le rôle et l'importance de la maintenance comme facteur déterminant de productivité et de compétitivité dans l'industrie, l'énergie et le transport n'est plus à démontrer.

Introduction Générale

L'objectif de cette thèse est d'établir les éléments utiles à la conception et à la réalisation de systèmes interactifs combinant les éléments du monde réel et du monde virtuel.
Notre démarche pour atteindre les objectifs nous a conduit à effectuer un état de l'art autour de cette problématique:

- La réalité augmentée et ses applications
- Les modèles d'Interaction Homme-Machine (IHM) pour les systèmes de réalité augmentée
- Les modèles d'architectures logicielles pour les systèmes interactifs.

A partir de l'analyse bibliographique sur les modèles d'Interaction Homme-Machine (IHM), nous avons constaté qu'il existait deux modèles d'interaction ASUR et IRVO prenant en compte les spécificités interactives de la RA mais de manière incomplète. Nous proposons pour notre première contribution une méthode de conception globale du système RA basée sur la notation UML.
Nous avons également examiné les modèles d'architectures logicielles pour les systèmes interactifs. Leur but est de fournir des stratégies de décomposition fonctionnelle structurelle pour les interfaces utilisateur afin de simplifier la conception et constituer un support de raisonnement. Le modèle Pac-Amodeus préconise des solutions pour palier à ces limitations.
Nous avons alors, comme point de départ pour la conception logicielle, adapté le modèle d'architecture logicielle Pac-Amodeus aux besoins de notre application. Cette approche représente la seconde contribution de notre travail.

Dans le *chapitre I,* nous introduisons et définissons le concept de la RA. Nous présentons une revue des applications de réalité augmentée recensées dans la littérature. Un intérêt particulier est donné aux applications liées au domaine de la maintenance.
Par la suite, nous examinons plusieurs taxonomies proposées dans la littérature et qui permettront de mieux cerner la réalité augmentée.
Enfin, nous concluons par une synthèse sur les applications recensées dans divers domaines en mettant l'accent sur les types d'augmentations les plus couramment utilisés.

Afin de fournir les éléments utiles à la conception et à la réalisation de systèmes interactifs, nous présentons dans le *chapitre II* les différents modèles classiques d'Interaction Homme-Machine (IHM). Nous présentons ensuite les modèles qui prennent en compte en partie les outils et les objets du monde réel comme moyen d'interaction. Nous examinons surtout les modèles ASUR et IRVO qui sont dédiés à la réalité augmentée. Nous présentons les limitations quant à leurs utilisations dans des systèmes de réalité augmentée. Nous étudions également les modèles d'architectures logicielles. Nous présentons les modèles d'architectures classiques. Nous concluons enfin ce chapitre par une synthèse générale sur les différents modèles.

Reposant sur la notation UML, nous présentons dans le *chapitre III* les éléments utiles à la conception ergonomique et logicielle de notre système interactif en les situant dans un cycle de vie logiciel. Nous traitons ensuite la conception logicielle en exposant notre modèle d'architecture logicielle qui est une adaptation du modèle PAC-Amodeus pour intégrer les spécificités des systèmes de RA. Nous concluons ce chapitre en établissant les liens entre les composants logiciels de notre modèle d'architecture et les entités et relations UML.

Nous examinons dans le c*hapitre IV* les résultats obtenus en mettant en application nos travaux conceptuels présentés dans les chapitres précédents. L'essentiel de nos résultats s'inscrivent dans le projet *ARIMA* (*Augmented Reality and Image Processing in e-Maintenance Application)*. Il s'agit d'un système qui cherche à étudier comment la RA peut aider dans des activités de e-maintenance. Nous exposons tout d'abord, les liens et apports de la RA dans un processus de maintenance. Nous exposons la réalisation logicielle selon notre modèle d'architecture logicielle. Nous étudions ensuite quelques procédures de maintenance et de e-maintenance utilisées dans le cadre de notre projet. Cette analyse nous permettra de nous affranchir des problèmes liés à la complexité et à la variété des tâches de maintenance. Nous concluons ce chapitre par les résultats de l'évaluation expérimentale de ARIMA.

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.

Le virtuel est ce qui nous aide à faire advenir ce que nous ne sommes pas encore.
— Le Monde de l'Education. Philippe Queau.

Chapitre I

La réalité augmentée : état de l'art

Introduction

L'Interaction Homme-Machine consiste en un échange entre un ordinateur et un utilisateur au travers de trois dispositifs, le clavier, la souris et l'écran. Ces périphériques définissent donc la seule frontière entre l'utilisateur et un système informatique. En ce sens, lorsqu'un utilisateur souhaite utiliser des ressources informatiques, il doit interrompre ses tâches dans le monde physique pour se focaliser sur les objets de sa tâche dans le monde numérique. Les nouveaux paradigmes d'Interaction Homme-Machine tels que la réalité augmentée ont pour but de favoriser l'interaction entre ces deux mondes, en tentant de conserver la continuité de l'interaction.
Nous nous intéressons dans ce chapitre à définir et introduire les notions clefs sur lesquelles nous allons nous appuyer pour élaborer notre étude sur la RA et son implication dans le domaine précis de la maintenance.
Nous commençons ce chapitre par les diverses définitions de la RA. Pour mieux cerner ce nouveau paradigme, nous définissons ensuite la réalité virtuelle. Nous examinons également plusieurs taxonomies proposées dans la littérature. Par la suite, nous passons en revue les différents domaines d'applications associées à la RA. Nous mettons également l'accent sur les applications proposées dans le domaine de la maintenance. Nous résumons alors par une synthèse sous forme de tableaux regroupant les applications proposées dans chaque domaine en mettant en évidence les caractéristiques les plus importantes dans ces applications et les dispositifs utilisés. Enfin, pour conclure, nous proposons une définition générale sur la RA.

I.1 La réalité augmentée : définitions

Avant d'aller plus loin, intéressons nous tout d'abord à la définition donnée par le petit Robert (2002).
Réalité n. f. bas lat. *realitas*->rien. Caractère de ce qui est réel, de ce qui ne constitue pas seulement un concept, mais une chose, un fait. … **.** Ce qui est réel, actuel, donnée comme tel à l'esprit.
Augmentée vr tr. Augmenter. Rendre plus grand, plus considérable, par addition d'une chose de même nature.

Selon Milgram [MK94], la RA est définie comme étant un environnement réel *augmenté* par des objets virtuels graphiques générés par ordinateur.
Azuma [Azu01] dans son état de l'art sur la RA énonce : *Un système de réalité augmentée complète le monde réel avec des objets virtuels (générés par ordinateur) de telle sorte qu'ils semblent coexister dans le même espace que le monde réel.* Cette définition est orientée vers des systèmes qui augmentent la vision. Mais toujours selon l'auteur, la RA peut potentiellement s'appliquer à tous les sens tel que le toucher ou l'ouie.
La RA définie par Tomas Baudel [Bau95] vise à augmenter les propriétés des objets de notre entourage de capacités de traitement d'information. En sus de leur fonction matérielle, ils acquièrent une dimension informatique, par leur capacité de réagir non pas aux seuls phénomènes physiques auxquels ils sont soumis, mais aussi aux informations qu'ils captent sur l'état de leur entourage (personnes, environnement, autres objets).
Dubois [Dub01] la définit comme suit : *La réalité augmentée est définie comme un moyen de favoriser l'interaction de l'utilisateur avec les deux mondes. Elle vise également à offrir à l'utilisateur la possibilité de bénéficier de moyens informatiques, tout en lui permettant de rester au contact de son environnement réel.*
Fuchs [FMA+03] quant à lui: *La réalité augmentée regroupe l'ensemble des techniques permettant d'associer un monde réel avec un monde virtuel, spécialement en utilisant l'intégration d'Images Réelles (IR) avec des Entités Virtuelles (EV) : images de synthèse, objets virtuels, textes, symboles, schémas, graphiques, etc. D'autres types d'association entre mondes réels et virtuels sont possibles par le son ou par le retour d'effort.*
Suite aux travaux de référence effectués par Wellner [Wel91] dans le domaine de recherche de l'interaction Homme-Machine (IHM), différentes notions ont été introduites.
Tandis que ces approches s'intéressent à la forme de l'augmentation, une autre approche consiste à étudier la cible de l'augmentation [Mac96]. Il définit la RA comme un moyen de réintégrer *l'information électronique dans le monde physique ou réel». Il identifie trois types d'augmentations* :

- *l'utilisateur* : Il est muni d'un dispositif généralement disposé sur sa tête ou ses mains et ce, afin d'obtenir des informations sur les objets physiques,

- *Les objets physiques* : Modifié en incorporant des périphériques d'entrée, de sortie ou des capacités informatiques sur ou en lui.
- *l'environnement* des dispositifs indépendants de l'utilisateur et des objets fournissent et rassemblent des données relatives à l'environnement.

Tel qu'il est énoncé dans les définitions données par la majorité des auteurs, la RA fait référence en permanence à des objets réels et virtuels. Avant d'aller plus loin, il s'agit donc d'essayer de définir ces notions, en particulier en reprenant les définitions qui ont été données dans le cadre de la réalité virtuelle.

I.2 La réalité virtuelle

I.2.1 Définitions

Le Dictionnaire des arts médiatiques de l'université de Montréal [GRAM96] définit la réalité virtuelle (RV) comme une technologie propre aux systèmes informatiques visant à créer des environnements qui simulent le monde naturel ou un monde imaginaire et qui donnent à l'utilisateur l'impression de la réalité.
Selon P.Fuchs [FMA+03], la RV est un domaine scientifique et technique exploitant l'informatique et les interfaces comportementales en vue de simuler dans un monde virtuel le comportement d'entités 3D, qui sont en interaction en temps réel, entre elles et avec un ou des utilisateurs en immersion pseudo naturelle par l'intermédiaire de canaux sensori-moteurs.
Cette définition introduit une terminologie nécessitant quelques explications permettant de mieux la situer :

1. Exploiter des potentialités de l'informatique, matérielles et logicielles pour réaliser techniquement un environnement virtuel interactif qui puisse être interfacé avec l'utilisateur.
2. Exploiter des interfaces matérielles de la RV, appelés interfaces comportementales qui sont principalement composées d'interfaces sensorielles et d'interfaces motrices. Les interfaces sensorielles informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel. Les interfaces motrices informent l'ordinateur des actions motrices.
3. Créer un monde virtuel interactif et en temps réel.
4. Interaction en temps réel obtenue si l'utilisateur ne perçoit pas de décalage temporel (latence) entre son action sur l'environnement virtuel et la réponse sensorielle de ce dernier.
5. l'utilisateur doit être en immersion pseudo naturelle la plus efficace possible dans le monde virtuel.

Les deux conditions, interaction et immersion, sont rarement réalisables parfaitement par rapport à l'application envisagée. C'est plutôt un objectif à atteindre. Par contre, elles doivent être en partie réalisées, pour parler d'un système basé sur les techniques de RV.
La figure 1.1 illustre le principe fondamental de la RV.

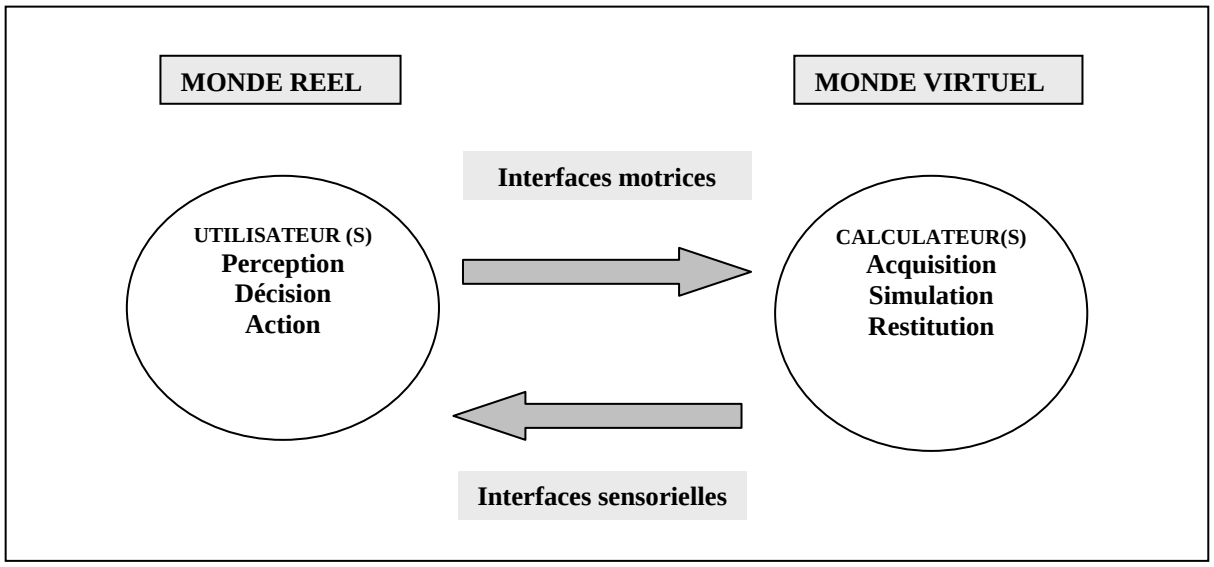


Figure 1.1. La boucle perception, cognition, action passant par le monde virtuel (selon P.Fuchs [FMA+03]

I.2.2 De la réalité virtuelle à la réalité augmentée

La RA est souvent comparée à la RV. En effet, la RV est définie comme un environnement interactif généré au moyen d'un ordinateur, et dans lequel une personne est totalement immergée, à l'opposé de la RA dont l'essence même est de pouvoir maintenir l'utilisateur au contact de son environnement réel [Azu97].
Cependant, de son côté, la communauté de synthèse d'images ne voit pas la RA comme une opposition à la RV mais comme une extension: il s'agit de réintroduire des éléments réels dans une scène virtuelle [Azu97]. De nos jours, on parle dans ce cas plutôt de Virtualité Augmentée. E.Dubois [Dub01] propose une synthèse des deux paradigmes en proposant un triangle de la RA qui complète celui de la RV (Figure 1.2).

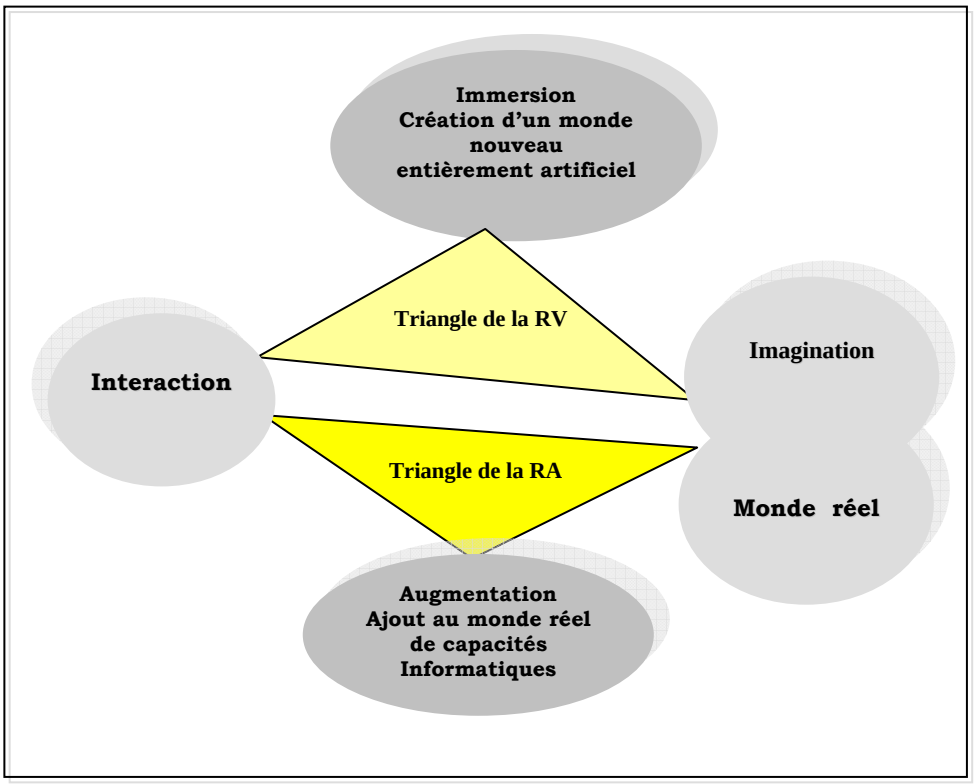


Figure 1.2. Triangles de la Réalité Augmentée (RA) et de la Réalité Virtuelle (RV) (image prise de [Dub01])

I.3 Continuum réel virtuel

La définition de la RA n'est pas unique et dépend des auteurs et de la communauté scientifique.
Avant de passer en revue les applications en RA, et au vu des différents critères qui constituent un système de RA, il convient d'établir un cadre de classification des divers systèmes existants. Dans la littérature, nous trouvons deux systèmes de classification.

- Une taxonomie qui classifie les systèmes suivant la manière dont l'association entre le réel et le virtuel est traitée. Elle est dite *fonctionnelle.*
- Une taxonomie qui s'intéresse aux différentes techniques d'affichage ou de vision du monde réel. Celle-ci est dite taxonomie *technique.*

Plusieurs taxonomies ont été élaborées mais chacune restreinte à un domaine précis. Nous allons dans ce qui suit dresser une étude comparative sur les différentes taxonomies faites. L'intérêt de ces taxonomies réside dans la possibilité de donner des critères précis permettant de classer différents systèmes les uns par rapport aux autres mais aussi avec ceux qui ne font pas partie de la famille des systèmes de RA et de réalité mixte.
Ces taxonomies sont également utiles lors de la phase de conception et ce, afin d'aider le concepteur dans le choix de ces dispositifs.
Mackay [Mac96] classe les différentes formes de RA selon le type d'augmentation.

1. *Augmenter l'utilisateur* : l'utilisateur est « augmenté » en portant un équipement généralement disposé sur sa tête tel que le casque de visualisation.
2. *Augmenter l'environnement* : l'environnement est augmenté autour de l'utilisateur et de l'objet réel. Dans ce cas, ni l'utilisateur ni l'objet ne sont affectés.
3. *Augmenter l'objet réel* : l'objet physique est changé en lui ajoutant des dispositifs d'entrée, de sortie ou un processeur sur ou dans l'objet.

Milgram [MK94] propose une taxonomie en adressant trois axes :

1. Etendue de la connaissance sur le monde : (EWK : Extent of World Knowledge) : Ce point détermine la capacité du système informatique à avoir connaissance des objets qui sont réels ou pas. Il traduit également le degré de modélisation du monde. La figure.1.3 montre qu'à une extrémité de l'axe se trouve un monde non modélisé (comme dans le cas d'un système de téléopération et ce, à l'aide d'un simple retour vidéo alors qu'à l'autre extrémité le monde est entièrement modélisé (ce qui est le cas des applications de RV).

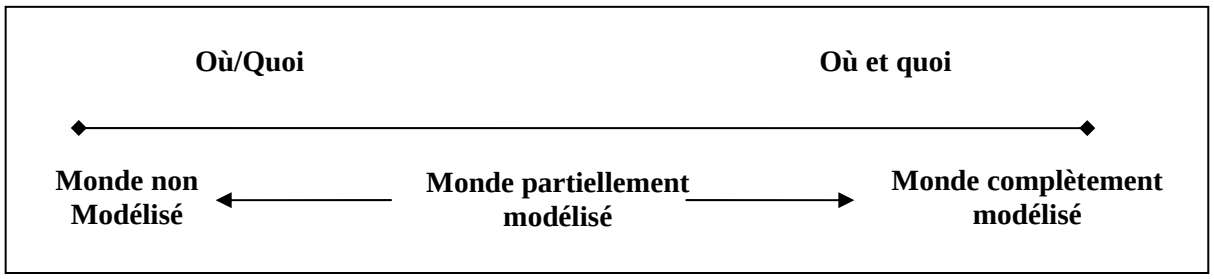


Figure 1.3. Degré de connaissance du monde réel

2. Fidélité de reproduction : (RF : reproduction fidelity) *:* cet axe définit la qualité de l'image que se soit pour des objets réels ou virtuels. Il est tributaire de deux facteurs :

*3. Etendue de la métaphore de présence (*EPM : Extent of Presence Metaphor) : détermine comment l'observateur se trouve *« présent »* dans l'environnement dans lequel il évolue ou immergé.

Il est à noter que Milgram considère implicitement la RA comme une extension de la RV ce qui limite quelque peu la portée de cette taxonomie.
Milgram [MK94] a également constaté que cette classification manque de précision et conduit à des contradictions. Pour cela, il propose d'autres caractéristiques de classification afin d'aboutir à une taxonomie plus formelle. Cette dernière se base sur trois critères:

1) *Portée de la connaissance du monde (Extent of the Wold Knowledge)***:** Regrouper les systèmes d'après leur connaissance de la scène. Autrement dit, la capacité de l'outil d'affichage à visualiser la scène entièrement et la qualité des traitements graphiques faits dans ce système.

2) *Fidélité de reproduction (Reproduction Fidelity):* Le fait de manipuler des données réelles et virtuelles en même temps conduit à utiliser des

techniques pour la numérisation de l'information analogique (provenant du monde réel). Mais le problème qui se pose est que la numérisation des données réelles peut induire à une perte d'information. De cela, nous pouvons classer les systèmes d'après leurs performances de rendu de la scène.

3) *La portée de la métaphore de présence (Extent of Presence Metaphor)* **:** Dans les systèmes de RV, l'utilisateur est totalement immergé dans un monde informatique, ce qui fait que les sensations de l'utilisateur sont très fortes. Par contre dans les systèmes de RA, l'utilisateur réagit avec les deux mondes. De cela là, il faut que ces systèmes garantissent le minimum de sensation à l'utilisateur dans la scène.
Nous pouvons schématiser la taxonomie présentée par P.Milgram où il définit la position de la RA dans l'axe des différents mondes existants (Figure 1.4).

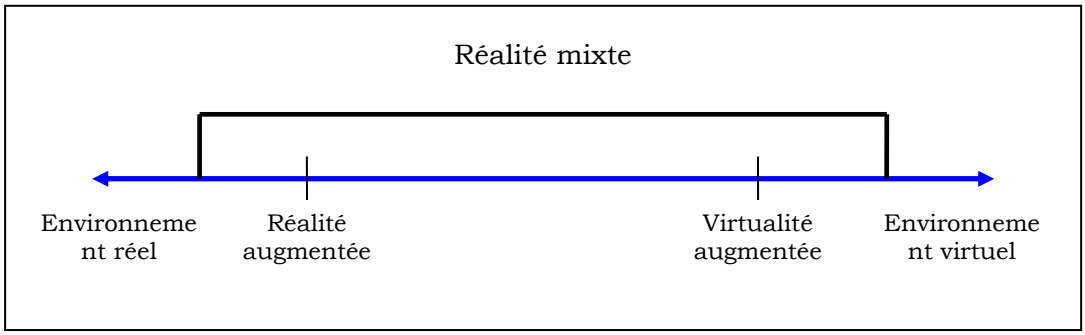


Figure 1.4.Continuum selon de P.Milgram

Cette taxonomie porte seulement sur les dispositifs d'affichage lors de la réalisation d'un système de RA. Mais cela n'est pas suffisant pour recenser tous les systèmes de RA. Cela est dû au fait qu'elle ne prend pas en compte les autres critères, telle que le niveau d'immersion de l'utilisateur, ni la fonctionnalité du système. Afin de remédier aux limites de cette approche, une autre approche basée sur l'Interaction Homme-Machine (IHM) a été proposée.
La taxonomie de Bowskill [BMD97] considère la RA comme étant la perception de phénomènes physiques par l'utilisateur et ce, grâce à des capteurs et à un système informatique. Il est clair que sa définition de la RA n'est pas aussi générale cependant la taxonomie qu'il propose mérite d'être citée.
Il considère que les systèmes peuvent être classés en deux catégories selon le type d'annotation que procure le système :

1. Annotation dépendante : l'annotation est dépendante de l'intervention de l'utilisateur. Il s'agit par exemple d'un système de reconnaissance de la parole dans le cadre d'une étape de maintenance en ligne sous forme de pages web.

2. Annotation indépendante : l'annotation ne demande pas l'intervention de l'utilisateur. Dans le cas le plus générique, le système de RA est une boite

noire qui reçoit des stimuli du monde réel en entrée et génère en sortie une représentation « augmentée » que l'utilisateur perçoit en symbiose avec le monde réel.
Milgram [MK94] a propose une taxonomie technique permettant d'introduire un certain nombre de notions attachées à la RA. Il définit alors sept classes de systèmes de RA classés selon le type de dispositif affichage utilisé ainsi que le rapport entre le réel et le virtuel.
Plusieurs dispositifs d'affichage peuvent être utilisés. Nous pouvons les regrouper comme suit :

- Les moniteurs vidéo,
- Les casques de RV : nous distinguons ici plusieurs types de casques :
  - Les casques de RV classiques (occlusifs car la réalité n'est pas perçue au directement au travers de ces derniers),
  - Les casques de RV à retour vidéo appelés également "Video see-through HMD" et composés de deux caméras permettant à l'opérateur une vision du monde réel.
  - Les casques de RV semi-transparents communément appelés "Optical see-through HMD". Ces casques permettent de voir directement le monde réel et de manière simultanée les augmentations virtuelles par le biais d'un système optique composé de prismes ou de miroirs semi réfléchissants

Le tableau.1.1 présente les sept classes de dispositifs identifiées par Milgram [MK94].

Type de système Périphérique, Augmentation	**Monde (réel/ virtuel**	**Repère (Exocentrique/ Egocentrique**	**Vision à l'échelle 1 :1**
1. Moniteur avec incrustations virtuelles	réel	Exocentrique	Non
2. Casque de RV, incrustations virtuelles	réel	Egocentrique	Non
3. Casque semi transparent de RV (optical see-through HMD), incrustations virtuelles	réel	Egocentrique	Oui
4. Casque de RV avec retour vidéo (Vidéo see-through HMD) avec incrustations virtuelles	réel	Egocentrique	Oui
5. Moniteur vidéo, monde virtuel avec incrustation vidéo	virtuel	Egocentrique	Non
6. Casque de RV, monde virtuel avec incrustation vidéo	virtuel	Egocentrique	Non
7. Monde virtuel, interaction avec objets réels	virtuel	Egocentrique	Oui

Tableau 1.1. Différentes classes des dispositifs d'affichage selon Milgram [MK94]

I.4 Exemples de systèmes RA

Il n'est évidement pas possible de décrire tous les systèmes de RA existants. Nous proposons dans cette section, une revue des différentes applications les plus connues. Nous exposons également les applications proposées dans le domaine de la maintenance.

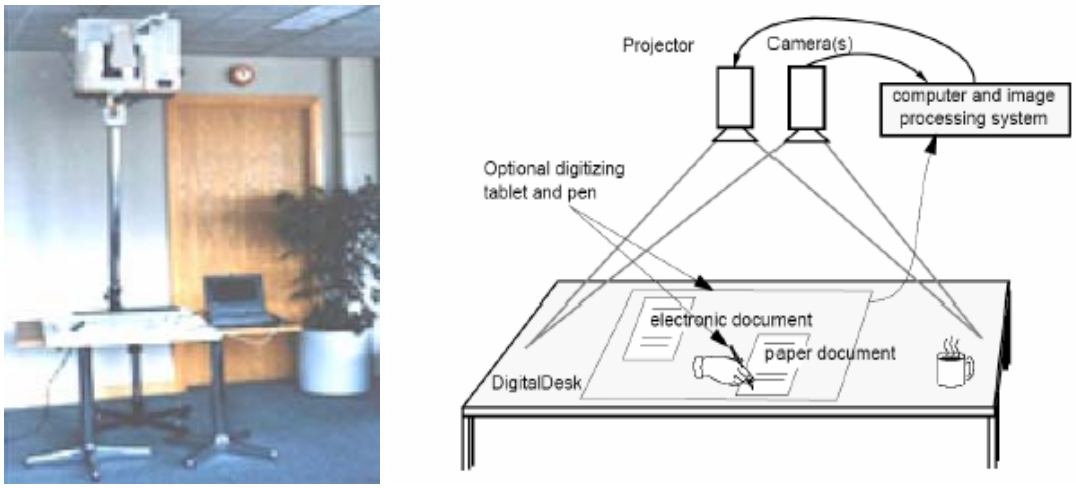
I.4.1 Applications pour la bureautique

Les applications principalement dérivées d'applications classiques de bureautique qui cherchent à augmenter les documents papiers sont très nombreuses. Nous allons donc dans ce qui suit décrire les plus répandues.

I.4.1.1 Le DigitalDesk [Wel93]

Mis a point par Wellner [Wel93], il est sans aucun doute l'un des systèmes de RA le plus répandu (figure 1.5 (a)). Il permet la manipulation de documents physiques et électroniques sur une même surface, à savoir un bureau. La figure 1.5 (b) montre le dispositif technologique du DigitalDesk. Il est composé principalement :
1. d'un vidéo projecteur qui affiche des documents virtuels sur le bureau. Il peut également compléter des documents réels posés sur le bureau.
2. d'une caméra qui permet de suivre les actions de l'utilisateur en utilisant soit un stylo ou directement le doigt de l'utilisateur, d'où le terme « digital ».
3. d'un micro qui détecte les tapotements de l'utilisateur sur le bureau qui sont le substitut au clic de la souris.

Contrairement à d'autres dispositifs existants, ce système n'utilise aucun dispositif d'affichage : le bureau fait office d'écran. En effet, c'est un projecteur vidéo qui rend perceptible les données virtuelles, textuelles ou graphiques, directement sur la surface de travail réelle de l'utilisateur.



(a) **(b)**

Figure 1.5. (a) le digital desk, (b) Dispositif du digital desk

I.4.1.2 Applications basées sur Navycam [RN95]

L'idée proposée par J.Rekimoto [RN95] est de pouvoir interagir sur le monde réel à travers un dispositif spécifique, le Navicam. Il est principalement composé d'un casque de visualisation semi-transparent (permettant l'affichage d'informations sur la scène réelle) porté par l'utilisateur et muni d'une caméra qui reconnaît les situations du monde réel en détectant des étiquettes portant un code barres en couleur (Figure 1.6).

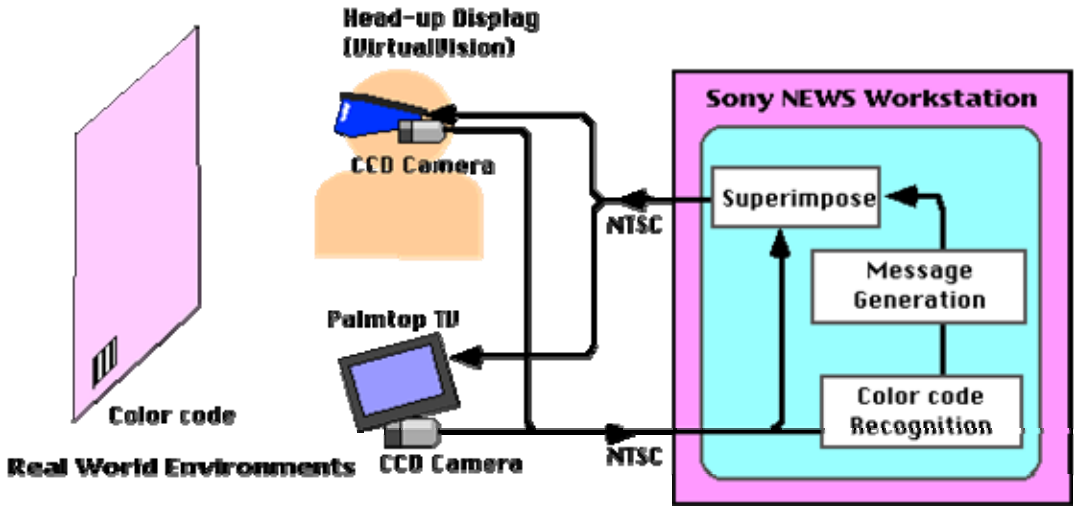


Figure 1.6. Architecture du système *Navycam*

I.4.1.3 Audio notebook [Sti96]

Proposé par L.Stifelman [Sti96], le système Audio Notebook est un dispositif qui permet à un utilisateur chargé d'un compte rendu de conférence de synchroniser sa prise de note "à la main" avec un enregistrement audio (figure 1.7). L'enregistrement audio se cale non seulement sur le rythme d'écriture du protagoniste mais aussi sur les moments où celui-ci tourne les pages de son carnet et ce, grâce à une "barre de défilement" audio qui génère une ligne de temps associé à chaque page de notes. Le système assure ainsi une corrélation entre le temps (la durée de l'enregistrement) et l'espace (sur la feuille de papier). Concrètement, les notes sont prises à l'aide d'un stylo numérique sur un support lui aussi numérisé et tout fonctionne comme si chaque pression du stylo ou chaque nouvelle page tournée du calepin faisaient figure d'index implicite pour l'enregistrement. Ainsi, durant la phase de réécriture, une simple pression du stylo sur une page indiquera à l'utilisateur à quel moment du discours le mot a été inscrit, donc prononcé, ce qui lui permettra de se caler sur le moment adéquat de l'enregistrement sans en passer par les traditionnelles fonctions "avance" et "retour rapide" des enregistreurs.

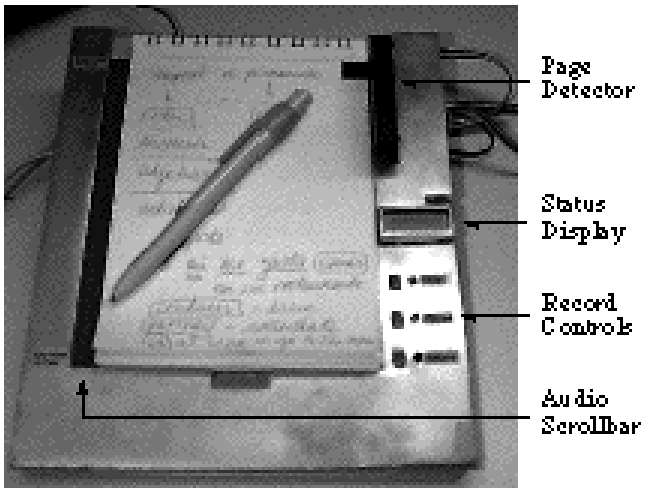


Figure 1.7. Prototype du système audio notebook

I.4.1.4 LivePaper [RR01]

Le système LivePaper [RR01] est un environnement vidéo qui augmente des documents réels avec projection d'informations.
La figure 1.8 montre un utilisateur du système LivePaper.



Figure 1.8. Un utilisateur du système LivePaper

De nombreuses applications basées sur ce dispositif ont été mises au point. Nous citerons une application collaborative dans le domaine de la bureautique basée sur le système LivePaper (figure. 1.9) [RR01]. Dans ce dispositif, seul un utilisateur dispose de la table interactive. Les autres utilisateurs distants disposant d'ordinateurs classiques peuvent se connecter au système LivePaper et visualiser les objets réels disposés sur la table et dessiner, grâce à une souris, des augmentations virtuelles qui sont projetées sur la table interactive grâce à un vidéo projecteur.

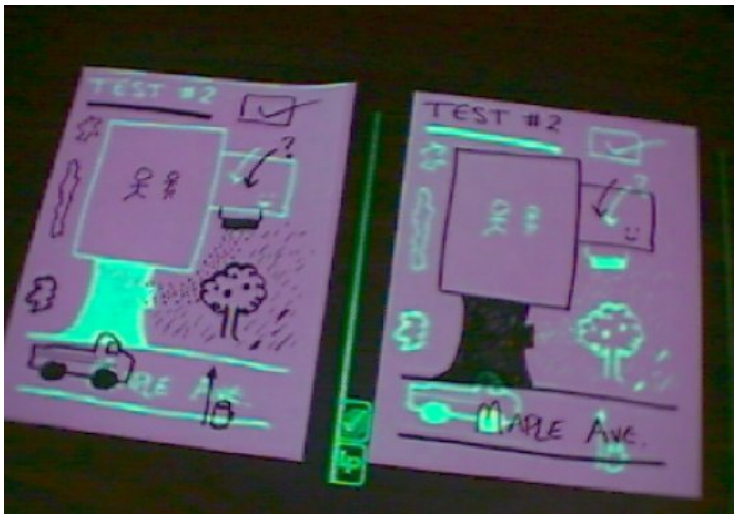


Figure 1.9. Application collaborative du système LivePaper

Nous pouvons citer également une autre application mono utilisateur dans le domaine de la musique (figure.1.10). Le joueur de musique utilisant le système LivePaper peut contrôler ses fichiers musicaux associés à des documents réels grâce à des boutons de commande virtuels (arrêt, pause, lecture…).



Figure 1.10. Un exemple d'application de Navicam dans le domaine de la musique

I.4.2 Applications dans le domaine Médical

Les applications médicales basées sur la RA sont très nombreuses. Nous avons essayé de regrouper celles qui nous ont parus les plus récentes.

I.4.2.1 Casper [Dub01]

Mis au point par Dubois [Dub01], le système CASPER (Computer ASsisted PERicardial puncture) permet sans avoir à faire une intervention lourde, d'aider un chirurgien à effectuer une ponction d'un liquide pathologique situé à proximité du cœur. Ce système permet au chirurgien une assistance

qui se traduit dans un premier temps par une série d'images échographiques du patient lui permettant de planifier la trajectoire idéale de l'aiguille, et dans un deuxième temps d'aider le chirurgien d'introduire l'aiguille en suivant une trajectoire idéale dont la position de l'aiguille est localisée en temps réel (figure.1.11).



Figure 1.11. Organisation du bloc opératoire lors de l'utilisation de CASPER en phase de guidage.

I.4.2.2 Medarpa (MEDical Augmented Reality for PAtients) [FSA+05]

L'objectif du système *Medarpa (MEDical Augmented Reality for PAtients)* [FSA+05] est d'apporter un support à la chirurgie endoscopique en utilisant les techniques de la RA (figure.1.12)). Le chirurgien en utilisant ce système pourra superposer des informations sous forme de modèles 3D directement sur le patient, sans devoir porter les dispositifs d'affichage qui peuvent être encombrants (casque de visualisation HMD muni de câbles restrictifs par exemple). Le chirurgien pourra ainsi effectuer son intervention sans devoir détourner le regard du patient en consultant les informations directement sur une fenêtre semi transparente appelée « fenêtre virtuelle » et cela à tout moment.



Figure 1.12. Système Medarpa (http://www.medarpa.de)

I.4.2.3 Virtual Mirror Box [OPM+03].

Cette application cherche à traiter le phénomène de membre fantôme dont souffrent de nombreux amputés parfois de manière sévère [OPM+03]. Le principe de traitement est d'utiliser une boîte dans laquelle les patients mettent le bras intact et qui comporte un miroir placé sur la ligne médiane de telle sorte que la réflexion de leur bras donne l'impression aux patients qu'ils ont deux bras intacts (figure.1.13). Le dispositif Virtual Mirror Box reproduit ce principe mais en utilisant un écran plat à la place du miroir qui affiche l'image 3D d'un bras virtuel. L'avantage est que le bras virtuel peut être déformé de manière à représenter les pathologies ressenties par le patient : bras plus court ou plus long, variation en épaisseur, par rapport au bras originel (figure.1.14).

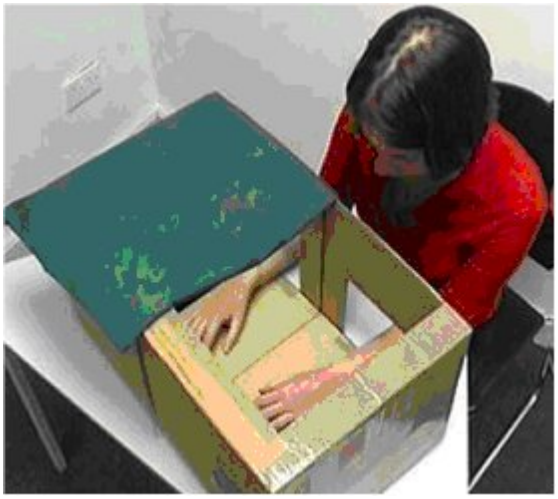


Figure 1.13. Le dispositif Virtual Mirror



Figure 1.14. Bras virtuel perçu par l'amputé

I.4.2.4 Ramp (Reality Augmentation for Medical Procedures) [SKV02].

Le système RAMP (Reality Augmentation for Medical Procedures) développé par *Siemens Corporate Research* est un système basé sur la RA dédié aux applications médicales [SKV02]. Ce système permet à l'utilisateur de percevoir des images médicales superposées à une vue réelle du patient de telle sorte que les structures dans les images apparaissent à l'endroit des structures anatomiques réelles.
Par exemple, une image d'une tumeur peut être vue à l'endroit de la tumeur réelle. Un casque de visualisation semi transparent de type HMD porté par le chirurgien lui fournit la vue augmentée stéréoscopique. Deux caméras miniatures sont montés sur le HMD et servent d'yeux artificiels (figure.1.15).

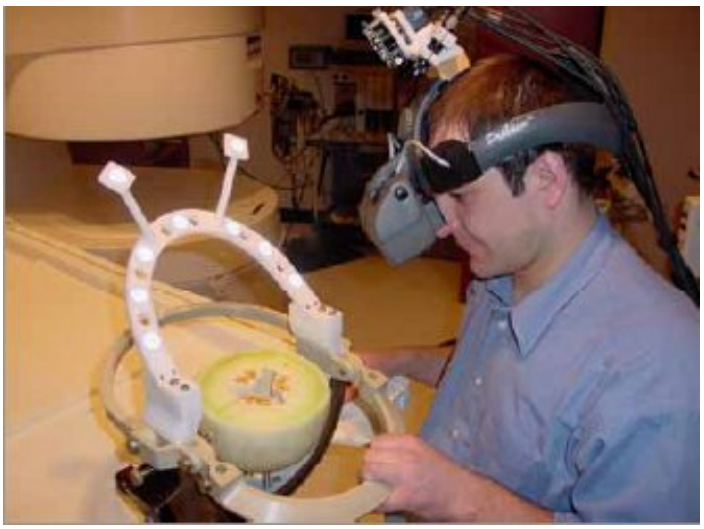


Figure 1.15. Le système RAMP

I.4.3 Applications pour la conception

Plusieurs systèmes dans le domaine de la conception ont été développés. Nous avons essayé de regrouper dans ce paragraphe les applications les plus répandues pour l'aide à la conception.

I.4.3.1 Le système Build-IT : Tangible Interaction for collaborative Design [FVB+00]

L'objectif du système Build-IT [FVB+00] [FLB+02] est de permettre à un groupe de coopérer afin de concevoir l'aménagement d'objets du monde réel tel que les écoles, les usines….
Les utilisateurs peuvent interagir autour d'une table à l'aide de briques physiques leur permettant de sélectionner et de manipuler des entités virtuelles qui sont projetées sur une table. Plusieurs briques peuvent être utilisées simultanément ce qui permet de travailler à plusieurs en même temps mais aussi d'avoir des interactions à 2 mains permettant des actions complexes. La figure.1.16 montre les utilisateurs travaillant autour d'une table. La figure.1.17 montre l'interaction entre deux briques physiques.



Figure 1.16.Vue générale du dispositif Build-IT

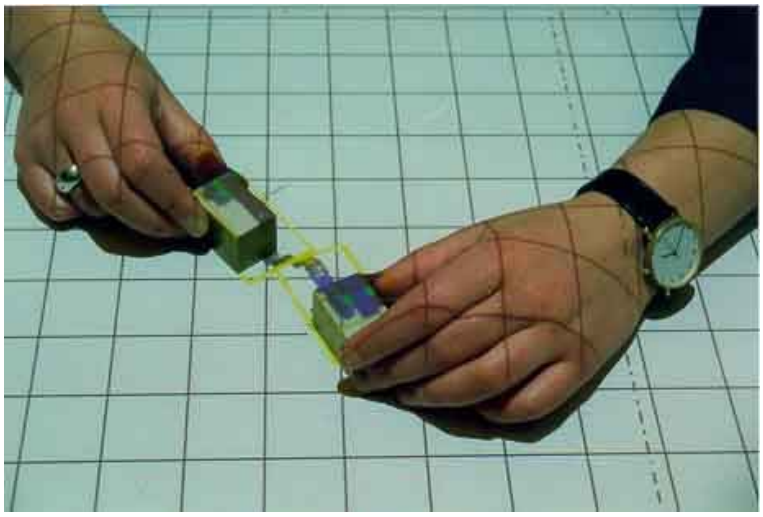


Figure 1.17. Vue détaillée d'une interaction avec deux briques

I.4.3.2 SeamlessDesign [KTY 99]

Le système SeamlessDesign [KTY99] [KTY00] (figure.1.18) est un environnement de travail collaboratif pour le prototypage rapide d'objets 3D ayant des contraintes géométriques. Deux utilisateurs portent des casques de visualisation semi transparent de type STHMD (Olympus Mediamask) muni de localisateurs pour le suivi des mouvements de la tête. Chaque utilisateur porte des gants numériques leur permettant d'interagir avec le système. Cette application est un environnement collaboratif utilisé uniquement pour deux utilisateurs.

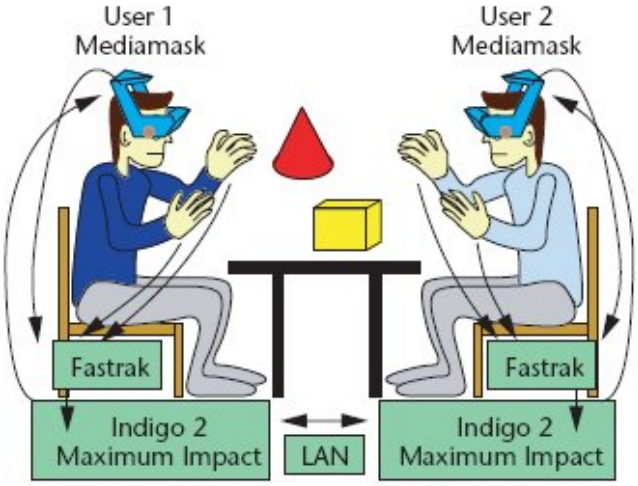


Figure 1.18. Configuration hardware du système SeamlessDesign. (image issue de *[KTY 00]*).

I.4.3.3 Le système Ambiente [SPM+02]

Ambiente [SPM+02] est un système qui propose un environnement collaboratif dédié à la conception (figure.1.19). Il est principalement composé de quatre éléments basés sur des technologies à écrans actifs: un écran mural de grandes surfaces, une table tactile, des sièges numériques de travail personnel et des tables connectables. Chacun des éléments définit des métaphores spécifiques et supporte l'échange de données avec les autres éléments.



Figure 1.19. Plusieurs utilisateurs coopérant avec les différents dispositifs du système

I.4.4 Applications pour l'architecture et l'urbanisme

I.4.4.1 ARTHUR (Augmented Round Table for Architecture and Urban Planning)[GMS+03]

Dans le projet *ARTHUR* (figure.1.20) [GMS+03] [PMF+04], chaque utilisateur est équipé d'un casque optique de haute résolution et de deux caméras. Ceci leur permet d'interagir avec des objets virtuels à l'aide de «*placeholder*», objets réels associés à des objets virtuels. Plus récemment, il propose en complément des techniques de reconnaissances de geste par vision pour la manipulation et l'accès au contrôle de l'application, ainsi que l'utilisation de la métaphore baguette magique. L'ensemble repose sur une architecture logicielle distribuée.



Figure 1.20. Utilisateurs du système ARTHUR

I.4.4.2 Architectural Anatomy [WFM+96].

Cette application basée sur la RA a pour objectif de montrer aux utilisateurs les parties d'un building cachées derrière les structures de finition [WFM+96]. Le système utilise un casque de visualisation semi-transparent pour générer une image virtuelle alignée sur la scène réelle. La figure.1.21 montre la visualisation en «fils de fer» d'informations supplémentaires

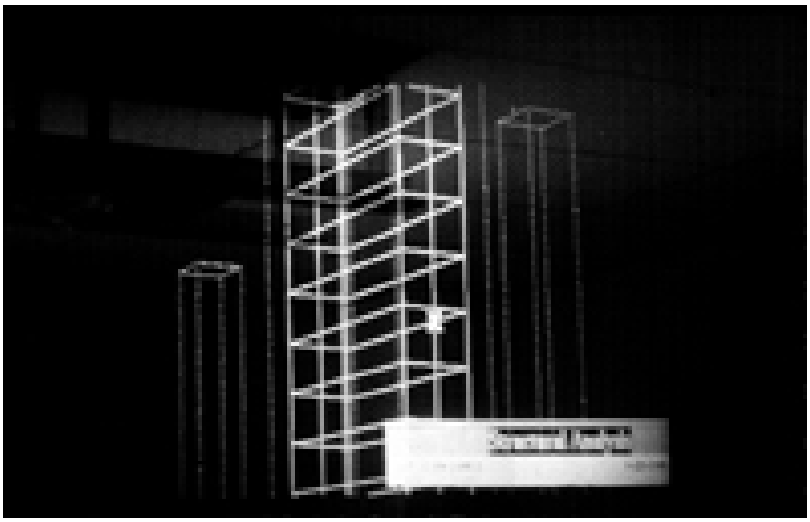


Figure 1.21. Visualisation en fil de fer de l'augmentation (image prise de [*WFM+ 96]*)

I.4.4.3 Le système Ariel [Mac98]

L'objectif du système *ARIEL* [Mac98] est d'augmenter l'utilisation d'un type particulier de documents. Le système utilise une tablette tactile de format A0 qui permet de capturer les annotations et les gestes de l'utilisateur (figure.1.22). Les images informatiques et les menus interactifs sont affichés sur la table et ce, en utilisant un vidéo projecteur.
Les plans sont identifiés par des codes-barres lus par un lecteur manipulé par l'utilisateur. Le positionnement précis du plan sur la table est réalisé par l'utilisateur par pointage des 4 coins. L'utilisateur peut faire des annotations sous forme d'hyperliens indiqués comme des « hotspots ». Il peut s'agir de notes textuelles, mais aussi audio ou vidéo. Pour éviter que les informations projetées ne se mêlent au dessin, ce qui peut-être perturbant, une fenêtre réelle (une simple feuille de papier blanc) est déplaçable par l'utilisateur et est suivie par le système à l'aide d'une diode électroluminescente placée dans le coin.



Figure 1.22. Dispositif Ariel (image prise de [Mac98])

I.4.5 Les applications pour les jeux

I.4.5.1 Jeu Mah-jongg [SEG98]

Cette application utilise la RA pour mettre en œuvre le très ancien jeu traditionnel chinois de Mah-Jongg [SEG98]. Le jeu se joue à 4 joueurs placés avec 144 pièces appelées *tuiles* comportant des figures différentes. Dans l'application proposée, la table de jeu et la main des joueurs (représentée par une tablette) sont réelles et l'ensemble des pièces est virtuel. Les joueurs portent des casques de visualisation semi transparent permettant de voir la vue augmentée tant de la table (muraille et tuiles posées) que de leur propre tablette (tuiles de leur *main*) comme le montre la figure.1.23. Les joueurs disposent également chacun d'un stylo avec un bouton pour sélectionner et manipuler les tuiles. L'ensemble des casques, des tablettes et des stylos est localisé en 3D par le système.



Figure 1.23. Le jeu Mah-Jongg (Image prise de *[SEG98]*)

I.4.5.2 TROC [BNR+02].

TROC est un jeu d'échange collaboratif sur support mobile exploitant les techniques de la RA [BNR+02]. C'est un jeu par équipe dont le but est de réunir une liste d'objets numériques en un temps limité. Un minimum de trois joueurs est nécessaire pour jouer. Le jeu est composé d'une tablette tactile et d'un microphone offrant différentes modalités d'entrée, comme la parole et la manipulation directe. En sortie, la multimodalité repose sur les dispositifs suivants : lunettes de RA semi transparentes, écouteurs et tablette. Les joueurs, se déplacent sur le terrain et visualisent les différents objets numériques. Chaque joueur dispose de quatre cubes physiques qui leur permettent de manipuler les objets numériques. Chaque cube peut contenir un objet numérique. Le joueur visualise et cible les objets numériques (vignettes représentant des animaux) (figure.1.24).

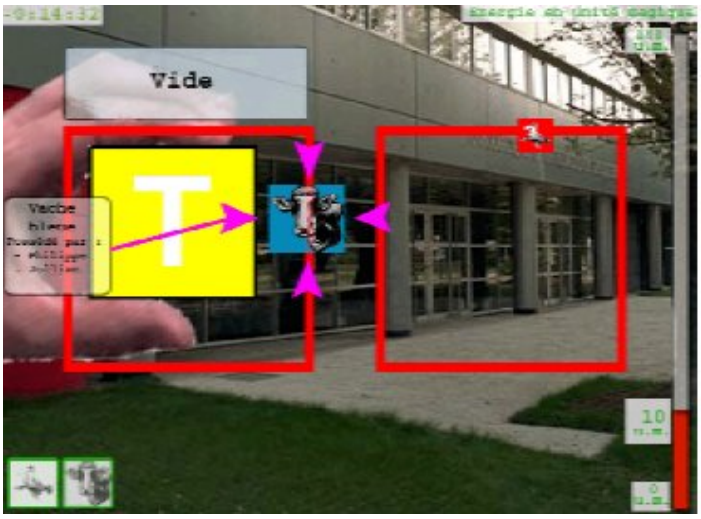


Figure 1.24. Récupération d'un objet numérique dans un cube physique (image prise de [RNB+04]).

I.4.5.3 Le train invisible [WPS05]

Développé dans les laboratoires de l'université de Vienne, Le train invisible est un jeu collaboratif mobile où les joueurs contrôlent un train virtuel évoluant sur une vraie maquette en bois représentant des rails [WPS05]. Ce train virtuel est visible seulement aux utilisateurs à travers leurs PDA (figure.1.25).



(a) (b)

Figure 1.25. (a) Contrôle du train virtuel à partir du PDA, (b) L'aspect collaboratif du jeu

I.4.6 Applications pour l'archéologie

I.4.6.1 Archeoguide [GD01]

Archeoguide (*Augmented Reality based Cultural Heritage On-site GUIDE*) est un projet de guide mobile basé sur un système de RA pour sites archéologiques [GD01]. Il a donné lieu à plusieurs expérimentations sur le site archéologique d'Olympie (figure.1.26). L'enjeu de ce projet est de développer une nouvelle approche des sites du patrimoine culturel en dépassant les contraintes des visites réelles ou virtuelles. Les visites traditionnelles des sites archéologiques proposent le plus souvent des plans de visites formatés, avec un faible taux d'interactivité, et des outils de médiation peu flexibles (car conçus pour répondre aux attentes d'un large

public). L'objectif étant de guider des visiteurs sur des sites archéologies et donc de superposer des objets virtuels, transmis par ordinateur, à un environnement réel, celui dans lequel ils évoluent. Ce système permet de reconstruire et restituer *in situ* des anciens monuments qui n'existent plus, mais aussi d'afficher toutes les informations utiles en surimpression.



Figure 1.26. Reconstitution d'une ruine grec sur un site archéologique

I.4.6.2 Magic [RNB04]

MAGIC (*Mobile Augmented Reality Group Interaction in Context)* [RN01], [RNB+04], [NSM+02] est une plate-forme d'accueil et de services qui permet à des équipes d'archéologues dispersées géographiquement d'avoir la possibilité de travailler en collaboration. Cette coopération inclut les archéologues agissant sur le terrain et des experts dans les différents centres qui apportent une aide pour coordonner les équipes sur place, qui fournissent des informations, reçoivent et traitent ces informations.
Chaque archéologue est muni d'un ordinateur mobile du type Tablet PC et d'un casque de visualisation semi-transparente sur lequel est fixé une caméra pour la prise de vues et la reconnaissance d'objets réels. Le champ de fouilles est représenté sous forme d'une carte dans l'interface du logiciel sur laquelle est superposée la position des différents utilisateurs. A chaque fois qu'un archéologue fait une découverte, il remplit une fiche décrivant l'objet ainsi que l'endroit où il l'a trouvé (figure.1.27). Il peut alors saisir les informations sur la base de données archéologiques et prendre une photo de l'objet grâce à la caméra en cliquant l'objet avec le pointeur de la souris visualisé sur le casque de visualisation semi transparent.

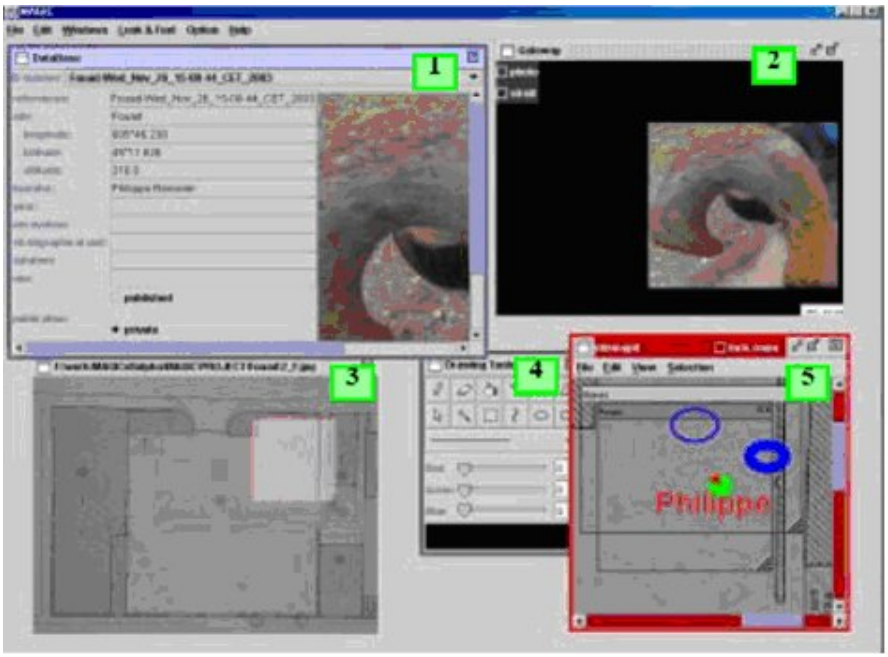


Figure 1.27.Une copie d'écran de l'interface sur la tablette du système MAGIC, la fenêtre en haut à droite est la vue qui est affichée sur le casque de visualisation semi-transparent (image prise de [RNB+04])

I.4.7 Applications pour la maintenance

I.4.7.1 KARMA [FMS93]

Karma acronyme de « *Knowledge-based Augmented Reality for Maintenance Assistance* » est un prototype de laboratoire expérimenté par l'équipe de Feiner au Computer Science Department de l'université de Californie du Sud au début des années 1990 [FMS93]. Le but principal de ce projet est de guider un opérateur pour des tâches de maintenance simples. Plutôt que de présenter l'information sur un écran d'ordinateur de manière textuelle et graphique, elle est directement présentée sous forme d'animations virtuelles superposées à la scène réelle.
Le prototype développé est la maintenance d'une imprimante laser. Elle a pour fonction deux tâches : le remplissage du bac à papier et le changement de la cartouche de toner. Grâce au casque de visualisation, les pièces à manipuler sont mises en évidence par leur contour en fil de fer. Le monde virtuel vient en surimpression de la vue du monde réel par le biais de deux écrans. Ces deux écrans sont pilotés par un ordinateur capable de repérer la position et l'axe de vue de l'utilisateur ainsi que la position de certains objets de l'entourage. Des objets en trois dimensions et en fil de fer sont synthétisés sur les deux écrans et fournissent une information virtuelle plaquée sur les objets réels (figure.1.28).



Figure 1.28. Le système Karma (photo issue de Feiner [FMS93])

I.4.7.2 Le système ARC (Augmented Reality for Construction) [WFM+96]

Ce projet initié en 1996 est un système d'aide à l'utilisateur pour réaliser les tâches d'assemblage d'une structure [WFM+96]. En portant un dispositif d'affichage, l'utilisateur est guidé étape par étape pour assembler correctement une structure par ajout de données textuelles ou graphiques (Figure.1.29). Un localisateur transmet les coordonnées et la position de l'utilisateur et de la structure au système informatique pour mettre à jour les données à afficher sur le dispositif de visualisation. Le système peut être étendu en ajoutant aussi des données sonores pour augmenter l'interaction de l'utilisateur et la machine.



Figure 1.29. Ce que voit l'utilisateur du système ARC à travers son casque de visualisation

I.4.7.3 STARMATE [Sch01]

Il s'agit d'un programme à l'échelle européenne (Fraunhofer Institut (ZGDV) et EADS Thomson-CSF (devenu depuis Thales Optronique), Dune, Tecnatom et CS-SI.
L'objectif est d'assister un opérateur de maintenance dans l'accomplissement des tâches de maintenance sur des systèmes mécaniques complexes [Sch01] [SL03]. Ce système permet d'apporter à la fois une assistance continue à l'utilisateur pour l'assemblage, le désassemblage des procédures de maintenance (figure.2.30) et une assistance pour la formation du personnel sur ces différentes tâches
Afin d'accomplir sa tâche de maintenance, le technicien est équipé :

- d'un casque de visualisation semi transparent,
- d'écouteurs pour fournir des informations audio supplémentaires,
- d'un microphone connecté à un système de reconnaissance vocale,
- d'un système de pointage pour permettre à l'utilisateur de désigner les objets avec lesquels il travaille,
- d'un système de suivi de mouvements constitué de deux caméras pourvues de filtres à infrarouges,
- d'une unité de transmission des données entre l'utilisateur et le reste du système.

L'architecture utilisée est une architecture modulaire. Elle se décompose:
1. Un superviseur qui régule et coordonne les flux de données envoyés par les différents processus temps réel.
2. Un module d'interprétation des commandes qui traduit les commandes vocales et celles issues du système de pointage en commandes compréhensibles par le système.
3. Un module de restitution qui est le moteur graphique de l'application.
4. Un module de suivi des objets qui informe le système sur la position des divers éléments de la scène.
5. Un module de gestion de scénarios. La gestion d'un scénario est subdivisée en deux parties :

- La procédure par défaut qui est constituée des différentes étapes du scénario. Chacune de ces étapes décrit les différentes augmentations requises par la manipulation.
- Les informations supplémentaires. Celles-ci décrivent les différentes augmentations qui peuvent être fournies à l'utilisateur en cas de demande de sa part.

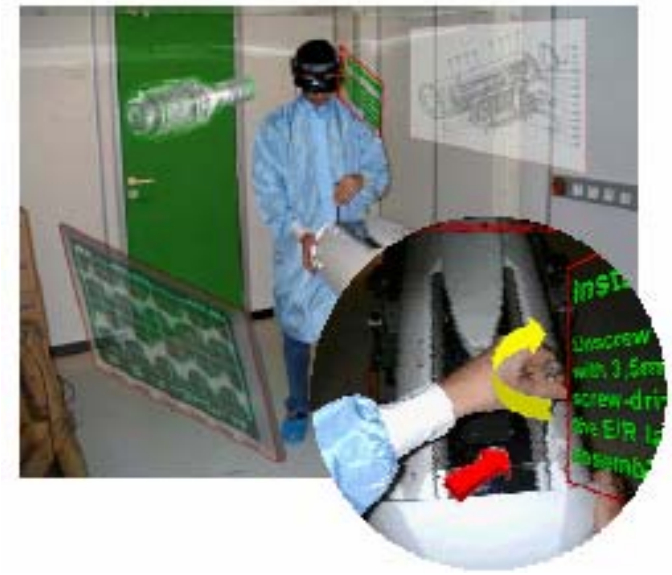


Figure 1.30. Augmentation de l'environnement de travail du technicien

I.4.7.4 ARVIKA [Ede02]

Ce projet de nature exploratoire [Ede02] (Figure.1.31) a démarré fin des années 1990 et regroupe un consortium allemand composé d'une vingtaine

de partenaires (EADS, Ford, BMW, Framatome et l'IGD). L'objectif est de développer les technologies basées sur le concept de la RA et les intégrer dans le cycle de vie complet des produits industriels, de la conception à la mise en service, en passant par la fabrication et la maintenance.
Les applications visées sont le développement, la production et les services dans les domaines de l'automobile et de l'aéronautique.



Figure 1.31. Exemple d'une augmentation (www.arvika.de)

I.4.7.5 SEAR [GGZ+03]

Le système SEAR (Speech-Enabled Augmented Reality), également appelé PARIS [GGZ+03] [GSZ+03] est un système générique de RA mobile utilisant un système de localisation basé sur la vidéo et offrant une interface multimodale graphique et vocale. L'application proposée permet à des techniciens de maintenance dans un environnement industriel de visualiser sur un ordinateur portable léger des données techniques sur les composants du système technique qu'il doit maintenir (Figure.1.32).



Figure 1.32. Système SEAR (d'après [GSZ+03])

I.4.7.6 AMRA [DRM+05]

AMRA est un système de RA à usage mobile pour une utilisation en milieu industriel, et plus spécifiquement dans le domaine de la maintenance industrielle [DRM+05] (figure.1.33).

Les objectifs de ce système sont multiples:

- Apporter aux agents de maintenance une assistance continue directement recalée sur leur poste de travail. Cette assistance se manifeste par l'envoi d'informations pertinentes (documentation de maintenance, modes opératoires, films de montage).
- Fournir une aide contextuelle à des maintenanciers novices, leur permettant d'être formés sur site.
- Augmenter la disponibilité de l'information sur le lieu de maintenance en utilisant les techniques de RA.

Le prototype AMRA est un système constitué d'un tablette-PC pour la visualisation des informations, qui agit comme une fenêtre augmentée sur le monde réel, grâce à la caméra (modèle Basler A100) embarquée sur ce dernier (figure 1.34). Ce type de système aborde plusieurs problématique : celle de l'informatique nomade (en anglais "mobile computing"), celle du recalage temps réel des entités virtuelles sur les images du monde réel, et enfin celle du développement d'une aide graphique contextuelle adaptée.
L'architecture employée est une architecture distribuée. Elle permet de partager les ressources et les flux de données entre l'unité mobile (le tablet-PC) et l'ordinateur distant qui fait le lien avec la base de données de maintenance et les algorithmes de traitement d'image pour le recalage.

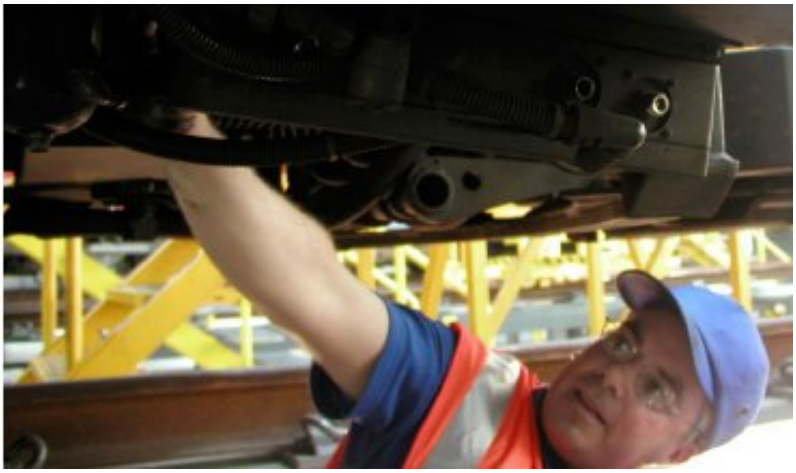


Figure 1.33. Position de l'opérateur pendant une des phases de maintenance (image prise de [Did05])

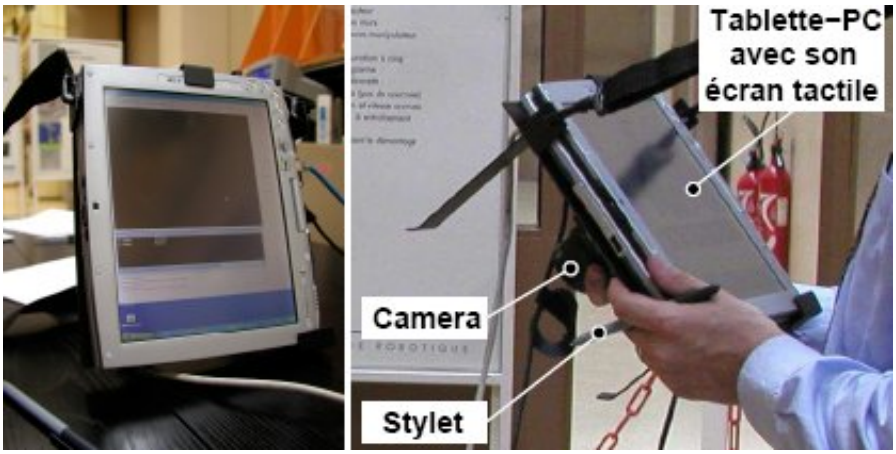


Figure 1.34. Dispositifs utilisés dans le système AMRA

I.4.8 Autres domaines d'applications

I.4.8.1 Le musée augmenté [RN95]

Cette application utilise le dispositif du Navicam. Le dispositif affiche des données dans un casque semi transparent porté par un visiteur du musée. Le système est basé sur la lecture d'un code barre et affiche dans un coin les informations relatives aux œuvres. La figure 1.35 montre la vue d'un utilisateur face à un tableau du musée. A tout moment, au cours de la visite, l'utilisateur voit les œuvres réelles ainsi que des données complémentaires ou augmentations, affichées dans le casque et restituées par l'ordinateur. Mise à part la phase de configuration du système, l'interaction entre l'utilisateur et le système est totalement transparent aux visiteurs



Figure 1.30. Le musée augmenté

I.4.8.2 Arlibrary [RN95]

Ce dispositif utilise le dispositif Ubiquitous Talker [RN95] qui est une version étendue de Navicam. Utilisé dans le domaine de la librairie augmentée, il permet d'aider l'utilisateur à sélectionner et localiser des publications dans une librairie. En lançant une recherche d'un livre ou d'un

magazine spécifique à travers une interface de recherche intuitive, le système fournit à l'utilisateur la position du livre ou du magazine (Figure.1.36).

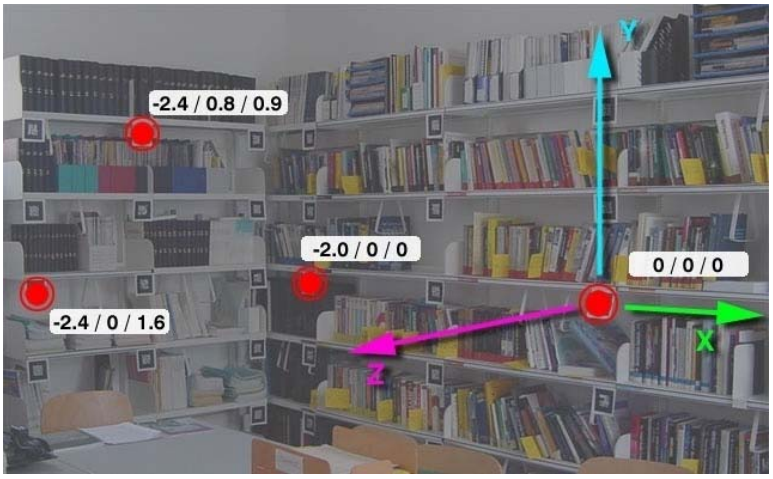


Figure 1.31. Exemple montrant les coordonnées relatives des livres résultant de la recherche

I.5 Synthèse et discussion

Nous allons présenter une synthèse sous forme de tableaux regroupant les applications présentées dans la partie 5 du présent chapitre. Ces tableaux mettent en évidence les caractéristiques les plus importantes de ces applications et des dispositifs utilisés (tableau .1.2 & tableau.1.3)

- La première colonne donne le nom de l'application.
- La seconde colonne donne le domaine couvert par chaque application.
- La troisième colonne indique les dispositifs d'entrée sortie employés.
- La quatrième colonne précise le type de l'augmentation: Réalité Augmentée (RA) ou Virtualité Augmentée VA selon la classification de Dubois en fonction de la nature de l'objet principal de la tâche.
- La cinquième colonne indique la nature de l'augmentation. Nous distinguons les augmentations de type visuel et celles de type sonore.

Il existe un grand nombre de systèmes dans divers domaines basés sur la RA. Nous avons essayé de présenter les applications qui nous ont semblé les plus intéressantes et les plus connues. Nous avons par contre mis l'accent sur les applications liées au domaine de la maintenance.
Nous avons aussi remarqué que sur les 31 applications recensées seules 3 sont rangés du coté de la virtualité augmentée. Le reste des applications faisant partie de la famille des applications de la RA. Concernant la nature de l'augmentation, une très grande majorité des applications utilisent l'augmentation visuelle éventuellement couplée à une augmentation sonore comme c'est le cas dans le projet STARMATE. Ceci explique aisément le choix du sens visuel devant les autres sens tel que le sens auditif.

Tableau 1.2. Synthèse de la revue des applications de Réalité augmentée

Nom De L'application		Domaine D'application	Type de Dispositifs	Augmentation	
				Type	**Nature**
Digitaldesk		Bureautique	Table, caméra, vidéoprojecteur	RA	Visuelle
Navicam	Active Paper Calendar	Bureautique	HMD ou PDA, caméra.	RA	Visuelle
	Active Door	Bureautique			Visuelle
Audio Notebook		Bureautique	Tablette tactile, micro, HP	RA	Sonore
Livepaper		Bureautique	Table, caméra, vidéo projecteur	RA	Visuelle
Casper		Chirurgie	HMD, localisateur	RA	Visuelle
Medarpa		Médecine	caméras infrarouges, Un écran semi transparent	RA	Visuelle
Virtual Mirror Box		Médecine	Ecran, gant	RA	Visuelle
Ramp		Médecine	HMD, caméras	RA	Visuelle
Build-IT		Conception	Table, briques, vidéoprojecteurs	RA	Visuelle
Seamlessdesign		Conception	HMD, gants, localisateur	VA	Visuelle
ARTHUR		Architecture	HMD,	RA	Visuelle Sonore
Architectural Anatomy		Architecture	HMD, localisateur	RA	Visuelle
Ariel		Architecture	Table, localisateur	RA	Visuelle
ARVIKA		Maintenance	HMD, cameras, tablette PC	RA	Visuelle sonore
STARMATE		Maintenance	Lunettes semi transparentes, caméras infrarouges inertielles, micro, casque audio.	RA	Visuelle Sonore
AMRA		Maintenance	Tablette PC, caméra	RA	Visuelle
SEAR		Maintenance	PDA, caméra, micro/casque audio	RA	Visuelle, Sonore

Tableau 1.3. Synthèse de la revue des applications de Réalité augmentée

Nom De L'application	**Domaine D'application**	**Type de Dispositifs**	**Augmentation**	
			Type	**Nature**
Jeu Mah-Jongg	Jeux	HMD, localisateur	VA	Visuelle
TROC	Jeux	Lunettes semi trasparentes, PDA, caméra, GPS	VA	Visuelle
Le Train Invisible	Jeux	PDA	RA	Visuelle
Archeoguide	Archéologie	PC portable, lunettes semi-tranparentes, caméra numérique	RA	Visuelle
Magic	Archéologie	lunette semi-tranparente, HMD, caméra, GPS	RA	Visuelle
Musée augmenté	Musée	HMD, caméra	RA	visuelle
Collaborative City-Planning	Architecture	HMD, caméras	RA	Visuelle
KARMA	Maintenance	HMD, camera ultrasons	RA	Visuelle

I.6 Conclusion

Nous avons vu à travers les définitions données que la RA est un domaine de recherche relativement récent. Il rassemble des chercheurs provenant de deux communautés: ceux de la synthèse d'images et ceux de l'Interaction Homme-Machine (IHM).
La communauté de synthèse d'images considère la RA comme un prolongement de la RV. Leur approche se limite à la description des systèmes basés sur un affichage combiné d'images réelle et virtuelle. L'objectif étant de reconstituer un environnement de RA aussi réaliste que possible.
Pour la communauté IHM, le but ultime recherché n'est pas la fusion des deux mondes mais la transparence dans l'interaction qui permet à l'utilisateur de porter son attention sur la tâche à réaliser et non sur l'utilisation de l'outil informatique. Le principal objectif est donc de profiter du meilleur des deux mondes en les intégrant de la manière la plus harmonieuse possible dans un objectif de cohérence et de continuité. Ces deux approches montrent bien leur complémentarité vis-à-vis de la RA. Néanmoins, il est difficile d'apporter une solution qui puisse satisfaire les deux communautés de chercheurs mais nous pourrons retenir la définition suivante:

La réalité augmentée décrit un système dans lequel l'interaction avec le monde réel est enrichie par des objets numériques générés par ordinateur.
Cette étude sur les systèmes de RA nous a également permis de mettre en exergue les différents points de vue que le concepteur peut choisir pour aborder l'analyse ou la conception d'un système. Nous proposons alors quatre points de vue : l'utilisateur, le domaine d'application, les dispositifs techniques et l'augmentation.
Enfin, afin de compléter cette revue sur le concept de la RA, il convient de dégager des modèles pour la conception et la réalisation des systèmes de RA. Nous abordons les différents modèles pour l'interaction Homme-Machine que nous décomposons en deux axes : les modèles liés à la conception d'interfaces et les modèles liés à l'organisation logicielle des systèmes interactifs. Cette étude fera l'objet du chapitre II

I have always wished that my computer would be as easy to use as my telephone.

My wish has come true. I no longer know how to use my telephone.

Bjarne Stroustrup

Chapitre II

Modèles pour l'interaction Homme-Machine

Introduction

La conception et la réalisation de systèmes interactifs sont une tâche complexe et nécessitent l'utilisation de modèles afin de réduire leur complexité.

Il existe deux grands groupes de modèles IHM [Bea00]:

- Les modèles qui permettent de guider à la conception d'un système interactif. Ces modèles permettent de définir un ensemble de règles, de principes liés à la conception de l'interface.
- Les modèles d'architecture qui définissent l'organisation logicielle d'un système interactif. Le principe de base de tous ces modèles est la séparation entre le noyau fonctionnel qui implémente les concepts propres à un domaine d'application particulier et l'interface qui présente ces concepts à l'utilisateur et qui lui permet de les manipuler. Les environnements de développement d'interfaces ont généré une grande variété de modèle d'implémentation comme le modèle Pac-amodeus que nous avons choisi et adapté à notre application.

Le chapitre est structuré comme suit : nous présentons tout d'abord les différents modèles d'interaction. Pour chaque modèle, nous évaluons leur intérêt quant à leur utilisation dans des systèmes de RA. Nous exposons

ensuite les modèles d'architecture existants. Nous concluons ce chapitre par une synthèse sur les différents modèles présentés ainsi que leurs limites qui nous conduisent à proposer notre propre modèle adapté à notre système.

II.1 Environnement et développement des systèmes interactifs : les modèles d'interaction

Un modèle d'interaction définit les principes fondamentaux qui décrivent la manière dont l'utilisateur interagit avec sa machine. Nous abordons dans cette section les modèles d'interaction utilisés dans la conception d'interfaces.

Nous présentons tout d'abord le modèle le plus couramment utilisé, le modèle d'interaction de Norman. Nous examinons ensuite le modèle d'interaction instrumentale et le modèle DPI. Nous passons également en revue les modèles qui prennent en compte les objets réels comme moyen d'interaction. A cet effet, nous présentons le modèle de l'activité médiatisé par l'instrument et le modèle de l'interaction physique de SATO.

Enfin, pour finir, nous présentons deux modèles dédiés à la RA : le modèle ASUR et le modèle IRVO

II.1.1 Modèle d'interaction de Norman : la théorie d'action de Norman

La Théorie de l'Action proposée par D.Norman [Vac92] [Nor86] permet de modéliser les différentes étapes cognitives mises en oeuvre dans la réalisation d'une tâche. Elle modélise le processus de réalisation et d'évaluation en sept étapes données comme suit (Figure.2.1):

- Etablissement d'un but pour l'utilisateur, représentation mentale de l'état que souhaite l'utilisateur pour le système.
- Spécification d'une séquence d'action, représentation psychologique des actions qui sont à exécuter sur le système.
- Exécution d'une action.
- Perception de l'état du système
- Interprétation de l'état du système effectuée sur l'état perçu en fonction des variables psychologiques impliquées dans le but.
- Evaluation de l'état du système du point de vue des buts et des intentions. Cela entraîne souvent un nouvel ensemble de buts et d'intentions.

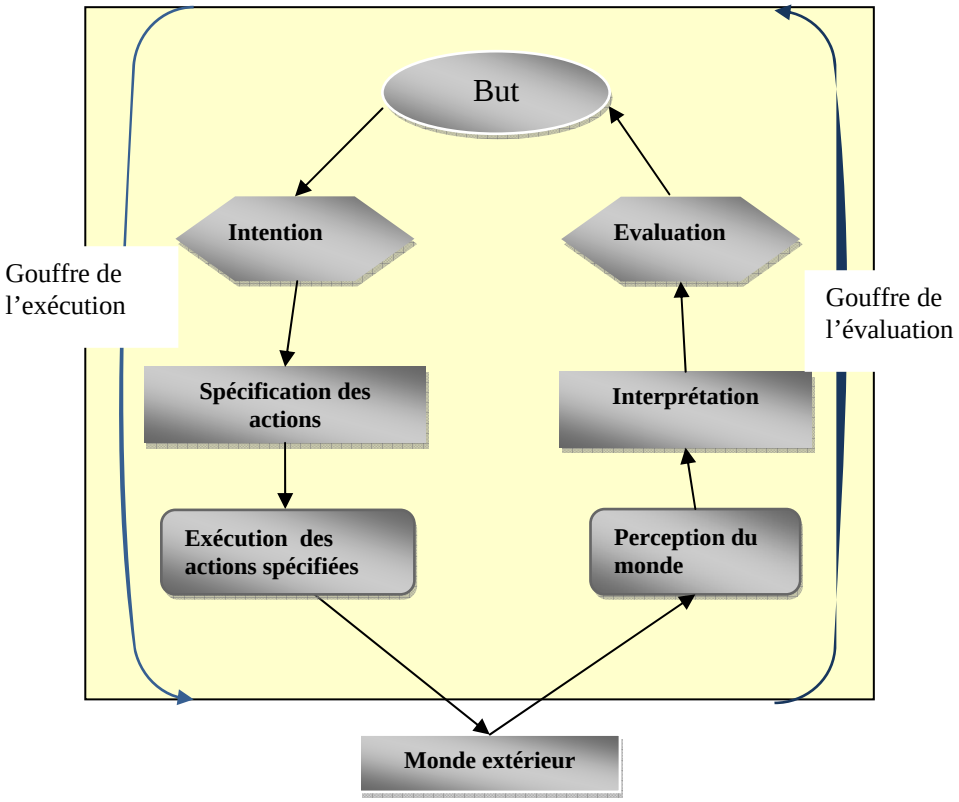


Figure 2. 1. Les sept étapes du modèle de Norman

L'accomplissement d'une tâche présente deux gouffres : le gouffre de l'exécution et le gouffre de l'évaluation.
L'exécution comporte trois étapes :

1. La *formation d'une intention* : elle vise à éliminer la distance entre le but et la représentation mentale que l'utilisateur se fait de l'état courant du système. La formation de l'intention a besoin d'une traduction entre les variables physiques du système et psychologiques du but,
2. la *spécification d'un plan d'actions :* celle-ci est indispensable pour atteindre le but. Cette spécification demande une traduction de l'intention psychologique en variables physiques,
3. *l'exécution :* elle est utilisée pour exécuter un plan d'action pour modifier l'état d'un système.

L'évaluation se décompose en trois étapes :

1. *La perception* : elle consiste à percevoir le retour d'information donné par un système après l'exécution d'un plan d'action.
2. *L'interprétation* : consiste à interpréter cette perception en variables psychologiques. Cette interprétation requiert une traduction entre les mondes physique et psychologique.
3. *L'évaluation :* consiste à évaluer un nouvel état du système par rapport au but fixé.

Le concepteur du système peut combler les gouffres en partant du côté du système en construisant des interfaces en entrée et en sortie qui correspondent mieux aux besoins de l'utilisateur. L'utilisateur comble les

gouffres en créant des plans, des séquences d'actions et des interprétations qui sont plus proches des formes requises par le système physique.

Intérêt du modèle de Norman par rapport à la réalité augmentée

Ce modèle pourrait être utilisé dans le cadre de la RA, toutefois comme il s'agit d'un modèle conceptuel, il ne peut être directement utilisé dans la conception de ce type de systèmes.
Selon les conclusions citées dans les travaux entrepris par Wellner [WMG93], l'un des principes fondateurs de la RA est la réintroduction des artefacts réels dans l'interaction avec l'ordinateur. On ne pourrait donc manipuler ces objets. Il serait erroné de penser que si l'on peut manipuler directement ces objets alors on obtient une interface à *manipulation directe* au sens propre et que les gouffres de l'interaction sont comblés. En effet, utiliser des objets réels couvre seulement l'aspect de l'engagement direct.
De plus, les objets réels ne remplacent pas les objets virtuels mais viennent en complément. On se retrouve finalement avec un problème double de manipulation d'objets réels d'une part et de manipulations d'objets virtuels d'autre part, chaque partie présentant ses propres gouffres de l'exécution et de l'évaluation.

II.1.2 Interaction instrumentale

Ce modèle d'interaction instrumentale [Bea00] est basé sur la notion d'*instrument d'interaction*, intermédiaire entre l'utilisateur et les objets qu'il manipule.
Pour présenter ce modèle, des objets manipulés par les instruments sont définis, puis les instruments eux-mêmes et enfin le principe de réification permettant de créer de nouveaux objets et de nouveaux instruments.
Les **objets** manipulés par les instruments sont en premier lieu les objets du domaine de l'application. Chaque objet est constitué d'un ensemble d'attributs qui sont des valeurs simples ou des objets complexes.
Les **instruments** sont eux même des objets, ce qui permet d'éditer leurs caractéristiques, voire d'en créer dynamiquement de nouveaux.
Chaque objet possède une ou plusieurs représentations. Chaque représentation correspond à une vue sur l'objet et présente un sous-ensemble de ses attributs.
Un instrument est composé d'une partie physique et d'une partie logique. La partie physique comprend les transducteurs d'entrée-sortie utilisés par l'instrument, en entrée pour capter l'action physique de l'utilisateur et en sortie pour lui présenter un retour d'information. En général, il s'agit de la souris et du clavier en entrée, et de l'écran en sortie. On peut cependant imaginer (et souhaiter) une plus grande palette de périphériques d'entrée et un retour tactile et/ou auditif de l'information. La partie logique de l'instrument comprend en entrée la méthode de transformation des actions de l'utilisateur sur l'instrument logique et en sortie la représentation de l'instrument. Par exemple, une barre de défilement verticale interprète

seulement les mouvements verticaux de la souris et sa représentation est constituée d'un ascenseur et de deux flèches (figure.2.2).

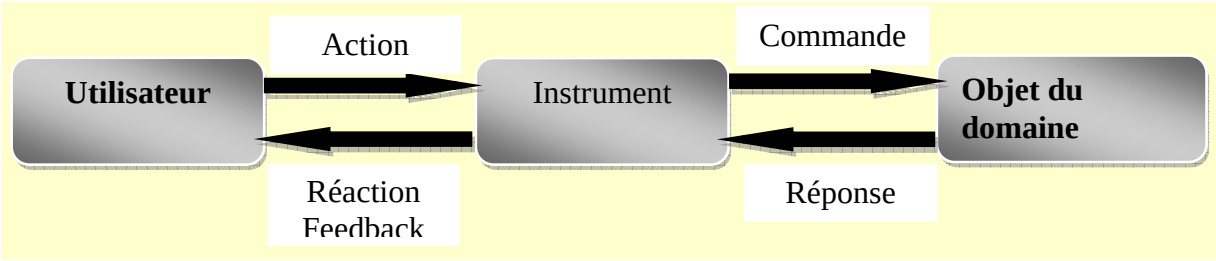


Figure 2. 2. Modèle d'interaction instrumentale

Intérêt de ce modèle pour la réalité augmentée

L'objectif de *l'interaction instrumentale* est la conception d'interfaces en faisant intervenir explicitement l'utilisateur avec le système informatique. Ce modèle introduit la notion d'instrument qui comporte le périphérique physique et la partie logicielle représentée à l'écran.
Une approche symétrique consiste à prendre des instruments et des objets physiques, et à y intégrer des capacités de traitement de l'information de façon à utiliser nos capacités naturelles à interagir avec des objets physiques. Cette approche, dite de RA [WMG93] [Bea94], utilise plusieurs techniques pour réaliser cette fusion entre monde physique et monde informatique : intégration de capacités de calcul dans les objets physiques, projection de données informatiques sur les objets physiques comme le papier, etc
Dans tous les cas, ce sont des instruments physiques qui supportent l'interaction (stylos, briques de Lego, papier, etc.). Les instruments logiques tendent à disparaître car les objets eux-mêmes ont une existence physique : l'interaction instrumentale a lieu alors principalement dans l'univers physique.
De ce point de vue, ce modèle prend partiellement en compte l'interaction avec le monde réel mais ne considère toutefois pas le cas où les objets du domaine sont réels, ce qui ne permet pas de l'utiliser comme modèle pour la RA. Cependant, la notion d'instrument est très pertinente et nous verrons que dans notre modèle UML, la notion d'outil est très proche

II.1.3 Le modèle DPI (document, présentations, instruments)

Ce modèle conceptuel [BB01] définit les composants fondamentaux de l'environnement et leurs relations. Il s'appuie sur la théorie de l'action de Norman [Nor86] qui décrit l'interaction comme une série de boucles intention, exécution, perception, évaluation. L'exécution passe par des instruments d'interaction, tandis que la perception passe par la représentation du document. Le fait qu'un document informatique puisse offrir plusieurs représentations, éventuellement simultanément, est une source à la fois de problèmes et de possibilités nouvelles. En particulier, les représentations multiples peuvent servir de base à l'édition collaborative,

chaque participant éditant le document à travers une représentation distincte.
Le modèle DPI (figure.2.3) est basé sur une abstraction de présentations multiples qui permet de voir et d'éditer un document à travers n'importe laquelle de ses présentations, ce qui introduit comme pré requis fondamental que les résultats des éditions doivent être visualisés dans toutes les présentations.
Un modèle fonctionnel destiné au concepteur des interfaces est également proposé. Il réifie les relations du modèle conceptuel en primitives :

- Primitives de persistance: ce sont les propriétés du document et de ses présentations.
- Primitives d'action: elles sont vues comme des services qui sont produits et consommés tout au long de la chaîne action-perception.
- Primitives de perception: ce sont les représentations qui sont la perception par l'utilisateur des propriétés du document.

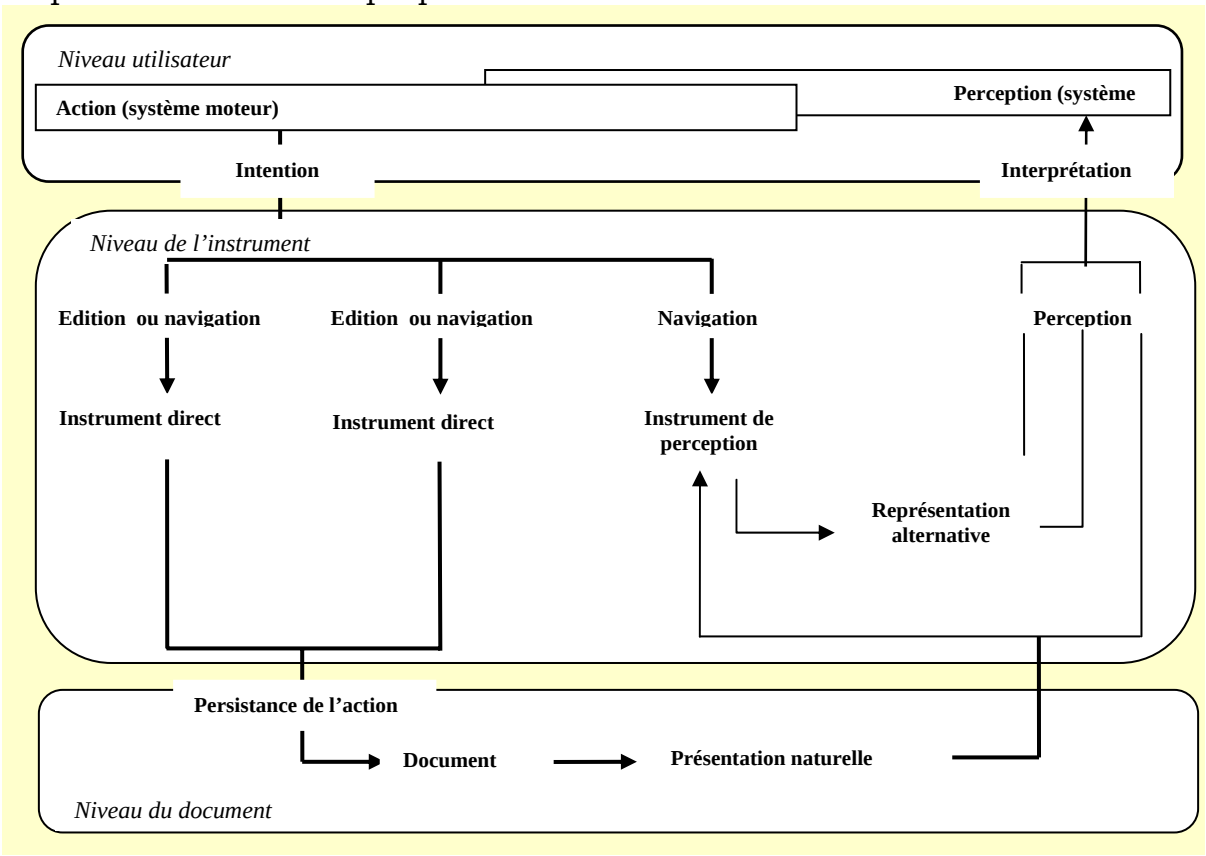


Figure 2. 3. Modèle conceptuel de DPI

Intérêt de ce modèle pour les systèmes de réalité augmentée

Le modèle DPI permet d'intégrer l'interaction instrumentale avec une approche centre sur les documents. Dans le cas de la RA, ce modèle ne considère que les documents numériques. En s'appuyant sur la théorie de l'action de Norman, son modèle conceptuel précise le rôle de l'instrument dans une boucle action-perception passant par l'utilisation d'un instrument et d'un document.

II.1.4 La théorie de l'activité médiatisée par l'instrument

Pierre Rabardel propose une « théorie de l'activité médiatisée par l'instrument et de genèse de l'instrument » [RW03] [RB03]. Dans cette approche le sens d'*instrument* est notablement différent car il s'agit d'une extension de la notion d'*outil* au sens de la théorie de la médiation par l'outil d'Engestöm issue de la théorie de l'Activité de Leontiev [FLB+02]. La théorie de l'Activité postule que toute action est liée à l'environnement matériel et social dans lequel elle se déroule. Selon ce point de vue, les actions sont socialement et physiquement situées, et les circonstances (notamment leur perception par le sujet) conditionnent l'interprétation de l'action. Celle-ci est alors considérée comme une réponse spécifique à cet ensemble de circonstances qui correspondent à des ressources et des contraintes liées à l'environnement.

Intérêt de ce modèle pour les systèmes de réalité augmenté

Ce modèle proposé par Pierre Rabardel est un modèle qui provient des sciences humaines et par conséquent difficile à appréhender pour les concepteurs des systèmes informatiques, notamment dans le cas d'un système de RA.

II.1.5 Le modèle d'interaction physique de SATO

Le but de ce modèle [SL00] est de modéliser les systèmes interactifs et permettre de mixer les éléments du monde réel, appelés « espace physique », et les éléments du monde numérique appelé « espace des médias » ou « monde virtuel». A cause de la complexité due à l'intégration de ces deux espaces, Sato [SL00] propose de se placer dans une approche centrée sur l'usager pour produire des systèmes qui satisfassent les besoins des utilisateurs tant sur les plans cognitifs, sociaux, culturels que sur le plan fonctionnel.
Huit cas d'interaction sont modélisés entre un utilisateur et une interface physique en relation avec les objets, l'environnement et l'espace des médias. Ils sont représentés comme suit :

- ***Le modèle H-P-O :*** ce modèle élémentaire représente la relation entre un utilisateur (H) et un objet physique (O). L'interface physique (P) est habituellement incorporée à l'objet lui-même.
- ***Le modèle H-P-O-M :*** dans ce modèle, les objets physiques peuvent être interconnectés entre eux d'une manière directe et indirecte. Ces objets incorporent des fonctionnalités informatiques : l'espace des médias (M) est informé dans le but d'augmenter l'objet ou établir l'accès à des informations à travers l'objet.
- **Le modèle H-P-M-MO :** dans le cas d'objets multiples (MO) à contrôler au même instant, un ensemble de types de médias est nécessaire pour transmettre un message de contrôle aux différentes unités qui forment un groupe.

- **Le modèle H-P-M-E :** ce modèle qui est identique au précédent permet non pas de contrôler des objets mais des environnements (E) tels que les lumières, le son ou l'air.
- **Le modèle H-E-M** : lorsque les fonctions informatiques et de réseau sont complètement incluses dans les artefacts ordinaires dans l'environnement, l'interaction de l'utilisateur a directement lieu avec ces artefacts sans interface spécialisé.
- **Le modèle H-P-M :** dans ce cas l'interface physique pilote directement les entités de l'espace des médias de manière plus directe que la souris ou le clavier. Ceci est clairement le modèle correspondant aux interfaces tangibles.
- **Le modèle H-P-M-RO :** ce modèle permet d'interagir avec des objets à distance (RO=Remote Objects) par l'intermédiaire de l'espace des médias. Comme exemple à cela le cas de la chirurgie à distance.
- **Le modèle H-P-M-P-H :** c'est le modèle de communication personne-personne médiatisé. L'espace des médias placé entre des utilisateurs distants essaye de fournir des facilités pour une meilleure interaction.

Intérêt de ce modèle pour la Réalité augmentée

Les huit modèles d'interaction physique présentés par Sato permettent de distinguer de manière pertinente les différents cas d'interaction avec le monde physique et les données issues du monde numérique. Cependant, ce modèle n'est pas du tout opérationnel car il n'existe pas de formalisme associé qui permet de modéliser une application concrète. En pratique, il présente plutôt une taxonomie des différents cas d'interaction possibles avec le monde réel.

II.2 Modèles spécifiques aux systèmes basés sur la réalité augmentée

Nous nous intéressons dans cette section à deux modèles dédiés à l'interaction de l'utilisateur avec les systèmes de RA. Il s'agit des modèles ASUR et IRVO.

II.2.1 Description du formalisme ASUR

Le modèle ou notation ASUR "***A****daptor*", "***S****ystem*", "***U****ser*", "***R****eal entities*" [DNT01] [Dub02] est utilisé pour décrire différentes facettes de l'interaction d'un utilisateur avec un système de RA et faciliter l'exploration des solutions permettant de fusionner les mondes physiques et numériques. Cette notation s'appuie sur trois points :

1. la mise en évidence des entités physiques et numériques requises pour réaliser une tâche particulière à l'aide du système,
2. l'identification des liens entre ces différentes entités,
3. la caractérisation de ces entités et liens.

Décrire avec ASUR une situation d'interaction repose sur l'identification des entités physiques ou numériques mises en œuvre lors de la réalisation de la tâche. Il existe quatre types de composants dans la notation ASUR:

- Les Adaptateurs **(A)**
- Le Système informatique **(S)**,
- L'Utilisateur (**U**) et
- Les entités Réelles (R)

Le **composant A** représente un adaptateur seul entité capable de transiter les données entre les deux mondes réel et physique. Nous distinguons deux types d'adaptateurs : des adaptateurs en entrée notés Ain permettant de transférer des données du monde physique vers le monde numérique et des adaptateurs en sortie notés Aout qui portent les données du monde numérique vers le monde physique.

Le **composant S** représente le système informatique sous-jacent, y compris les capacités de traitements (noyau fonctionnel), de stockage, d'acquisition et de rendu de données. Dans le cas du musée augmenté, la base de données est incluse dans ce composant.

Le **composant U** dénote l'utilisateur du système interactif mixte. Il s'agit ici du visiteur.

Le **composant R** dépeint une entité physique manipulée au cours de la tâche. Deux formes de composants R co-existent : une entité physique joue soit le rôle d'un outil (R_{Tool}) concourant à la réalisation de la tâche, soit celui d'objet de la tâche (R_{Object}), c'est-à-dire d'entité sur laquelle porte la tâche. Dans l'exemple du musée augmentée (CF §I.4.8.1), chaque oeuvre d'art constitue un objet de la tâche.
Ces composants ne sont pas totalement autonomes et nécessitent d'échanger des données au cours de la réalisation de la tâche. Le concept des relations ASUR permet de représenter ces échanges de données.
Les échanges de données entre tous ces composants au cours de la réalisation d'une tâche donnée se traduisent dans le modèle ASUR par trois relations : échange de données, proximités physiques et déclanchements.
Un échange de données (A→B) traduit la capacité offerte au composant B de percevoir des données portées par le composant A.
Par exemple, le visiteur perçoit l'œuvre d'art (R_{object}→U) et les données complémentaires sur son PDA (A_{out}→U). L'œuvre et le visiteur sont suivis par des localisateurs (R_{object}→A_{in1}, U→A_{in2}) qui transmettent les positions au système informatique (A_{in1}→S, A_{in2}→S). Après traitements, le système met à jour les données affichées sur le PDA (S→A_{out}). Une proximité physique (A==B), traduit le fait que A est contre B, inclus dans B, tenu par B, etc.
D'après le scénario du musée (Figure.2.4), le dispositif d'affichage est porté par l'utilisateur (A_{Out}==U). Enfin, un déclenchement (A→B) est toujours lié à un échange de données (C→D) et traduit qu'un échange de données entre C et D ne se produira que sous une certaine condition spatiale impliquant A et B. Par exemple, le passage d'un visiteur, porteur d'un active badge, devant

une œuvre d'art ($U \rightarrow R_{object}$), déclencherait le transfert de données entre l'œuvre et un localisateur ($R_{Object} \rightarrow A_{In}$).
La Figure.3.4 résume les composants et relations ASUR mis en oeuvre dans le musée augmenté. Plusieurs dispositifs candidats sont alors envisageables : par exemple, l'adaptateur de sortie pourrait être un casque semi-transparent (HMD) ou bien un PC de poche (PDA). Pourtant, superposer (HMD) ou juxtaposer (PDA) des données numériques et physiques, modifie l'utilisabilité du système. Aussi, les caractéristiques des composants et relations ASUR visent à affiner la description fournie par les diagrammes ASUR et constitue un ensemble d'aspects à prendre en compte lors de la conception d'un système mixte. Cet ensemble est basé sur des caractéristiques identifiées par des approches de conception de systèmes de RA et des caractéristiques spécifiquement liées à la manipulation d'objets physiques.

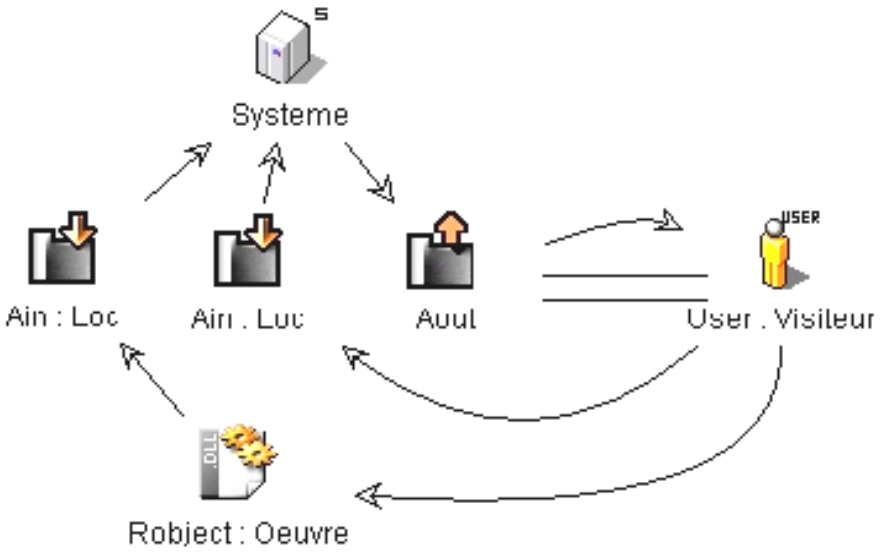


Figure 2. 4. Description ASUR du scénario du musée augmenté ([Dub02])

Avantages et inconvénients du modèle ASUR

Ce modèle présente plusieurs avantages quant à son utilisation dans un système de RA :

- Il permet de mettre en évidence les différentes entités numériques et physiques pour réaliser une tâche particulière, d'identifier les liens entre ces différentes entités et enfin de caractériser ces entités et ces liens.
- Il permet de favoriser l'identification de caractéristiques du langage non mis en évidence par les approches basées sur l'analyse du type de données.
- Cette caractérisation permet de raisonner sur l'utilisabilité du système mixte en cours de conception en vérifiant des propriétés ergonomiques.
- Il permet d'aider à la classification des systèmes. En caractérisant les entités du monde réel, il permet de rapidement identifier la classe de système : RA ou Virtualité Augmentée.

Cependant, il présente certaines limites quant à son utilisation :
- Les deux types d'augmentation (exécution augmentée et évaluation augmentée ne sont pas apparentes dans les schémas ASUR
- Les outils et objets virtuels ne sont pas représentés ; ainsi ASUR est d'un intérêt limité pour modéliser des applications de Virtualité Augmentée.
- Un seul utilisateur est représenté. ASUR ne peut donc prendre en compte les systèmes collaboratifs. En clair, le modèle ASUR ne modélise le système que pour une tâche précise. Un seul scénario comprend plusieurs tâches et le système comprend plusieurs scénarios ce qui implique l'apparition d'une multitude de modèles pour un même système.

II.2.2 Le modèle IRVO

Le modèle IRVO (*Interacting with Real and Virtual Object)* a été introduit par Chalon et David dans le but de modéliser l'interaction entre le (ou les) utilisateur(s) et le système de RA en explicitant les outils et objets (tant réels que virtuels) mis en jeu et leurs relations [Chal02] [CD04].
Les principales entités présentes sont d'une part L'**utilisateur** (U) ou plus généralement les utilisateurs pour les systèmes collaboratifs ; chacun d'eux est muni de trois canaux, visuels, audio et kinesthésique/haptique. Ceux-ci agissent sur des **Outils** notés T (tools), qu'ils soient physiques ou numériques, pour modifier l'état des Objets (physiques ou numériques) notés O. La liaison entre les mondes physique et numérique se fait à travers des **Capteurs** (en entrée du système informatique) notés S, et des **Effecteurs** (en sortie) notés E, représentés au centre des diagrammes, sur la frontière entre les deux mondes (ligne en pointillé).
Une autre frontière (ligne verticale pleine) matérialise l'éloignement dans le monde physique des lieux d'interaction. Enfin le noyau de l'application est matérialisé par le **composant M**. Les relations entre chaque composant représentent les échanges de données. Chacune d'elle peut être annotée d'un symbole la liant à une sous tâche du modèle CTT correspondant.
Ici aussi, l'utilisation d'une notation graphique est très importante pour rendre les modèles plus intuitifs. Cependant, la plupart des informations du modèle étant présentes sur les diagrammes, la lisibilité de ceux-ci n'en devient que plus difficile.
Les schémas de la figure.2.5 montrent les principales relations et les entités dans le cas de l'interaction d'un utilisateur.

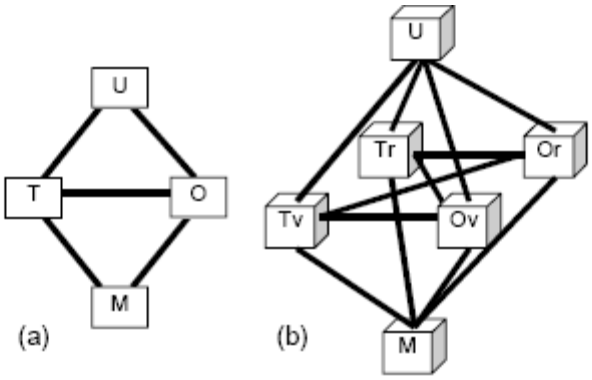


Figure 2. 5. Les principales entités et leurs relations ([Cha04])

Le modèle IRVO permet également de représenter simultanément l'interaction de plusieurs utilisateurs ce qui permet de prendre en compte le travail collaboratif. La figure 2.6 montre deux cas d'interaction multi-utilisateurs :

- Dans la figure 2.6a, les utilisateurs partagent les mêmes outils et les mêmes objets du domaine ; il s'agit d'un cas de travail collaboratif co-localisé.
- Dans la figure 2.6b, les utilisateurs utilisent leurs propres outils et objets du domaine: cela peut tout aussi bien représenter du travail collaboratif co-localisé ou à distance. Dans cette figure, il se peut qu'un objet comme O1 soit réel (et augmenté) et que les autres (O2 et O3) soient virtuels. Ainsi les utilisateurs U2 et U3 peuvent voir les résultats des actions de U1 et peuvent agir avec des outils T2 et T3 (réels ou virtuels), la cohérence de l'ensemble étant assurée par le modèle interne M.

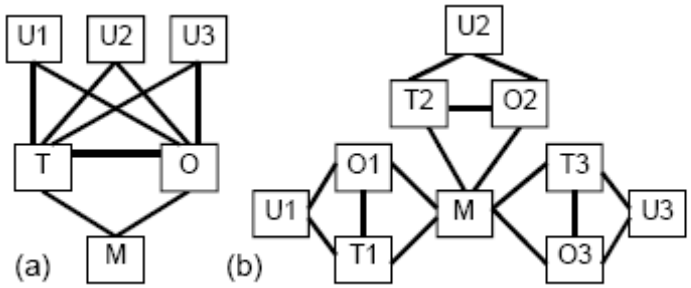


Figure 2. 6. Exemples de modélisations du travail collaborative : a: outils et objets partagés; b: outils et objets propres à chaque utilisateur ([Cha04])

Avantage et inconvénients du modèle IRVO

L'objectif principal d'IRVO est de modéliser l'interaction entre le (ou les) utilisateur(s) et le système de Réalité Augmentée en explicitant les outils et objets du domaine (tant réels que virtuels) mis en jeu et leurs relations, en se plaçant au niveau des tâches élémentaires d'interaction. IRVO insiste tout particulièrement sur la modélisation des outils et objets du domaine : ils peuvent être réels ou virtuels selon leur position par rapport à la frontière entre le monde réel (dans lequel est placé l'utilisateur) et le monde virtuel (dans lequel est le programme informatique). Les objets mixtes apparaissent

ainsi comme une abstraction de conception : ils sont composés d'un ou plusieurs objets réels et virtuels et l'augmentation provient soit de la perception « fusionnelle » que les utilisateurs ont des différents composants, soit de leur capacité à agir dans les deux mondes (pour les outils).

II.3 Modèles d'architectures logicielles : modèles de références pour les systèmes interactifs

Les modèles d'architecture constituent un des éléments essentiels sur lequel doit s'appuyer le génie logiciel. Il représente l'élaboration et l'utilisation des logiciels et joue un rôle important dans leur qualité et leur efficacité.

L'utilisation des modèles d'architecture comme est souligné par Garlan [Gar95] peut avoir un effet considérable sur plusieurs aspects du développement des logiciels.

Ces aspects peuvent se résumer en cinq points :

(1) La compréhension : les architectures software simplifient notre capacité de comprendre la structure de grands systèmes à un niveau d'abstraction adapté. Les contraintes et choix de conception peuvent ainsi être mieux explicités et expliqués;

(2) La réutilisation : la réutilisation des composants est largement encouragée par la définition d'architectures, mais il est également possible de réutiliser des structures plus complexes définies sous forme de motifs de conception ou *design patterns* ;

(3) L'évolution et la **(4) maintenance** profitent largement de la définition d'architectures logicielles. En comprenant les ramifications et les connexions de chaque composant, il est beaucoup plus facile de déterminer a priori les coûts potentiels de toute modification ;

(5) L'analyse : les descriptions architecturales fournissent un nouvelle occasion pour l'analyse, y compris les formes à niveau élevé de vérification d'uniformité de système. Selon les modèles utilisés, on peut envisager des formes de vérification de cohérence, de respect de styles, de satisfaction de critères de qualité voire d'adaptation à des domaines spécifiques d'application ;

La gestion des projets industriels doit s'appuyer sur cet élément essentiel pour déterminer au plus tôt la viabilité des options choisies, les pré-requis indispensables et les perspectives d'évolution.

Les modèles d'architecture partent du principe qu'un système interactif comporte une partie **interface** et une partie **noyau fonctionnel** qui se réfère au domaine de l'application. Le noyau fonctionnel est considéré comme préexistant, et les modèles de systèmes interactifs décrivent essentiellement la partie interface, ainsi que ses relations avec les objets du domaine.

La plupart des modèles identifient au moins trois types d'éléments.

- les éléments en contact direct avec l'utilisateur (présentations) ;

- les éléments en contact direct avec le noyau fonctionnel ou qui en font partie (interfaces du noyau fonctionnel, abstractions, etc.) ;
- les éléments de communication entre les deux premiers éléments (contrôleurs, adaptateurs).

Dans cette section, nous présentons les modèles d'architectures classiques. Nous nous contentons dans ce qui suit de citer ceux qui sont le plus couramment utilisés : les modèles à couches (Seeheim et Ach), les modèles multi-agents (MVC, PAC et AMF) et le modèle hybride Pac-Amdeus qui est le rapprochement entre PAC et ARCH. Nous présentons ensuite une adaptation du modèle Pac-Amodeus qui a été faite pour prendre en compte la RA, avant de faire une synthèse générale sur ces modèles.

II.3.1 Les modèles à couches

Nous présentons dans ce qui suit, le modèle de Seeheim original et sa version révisée Arch.

II.3.1.1 Les principes du modèle de Seeheim

Le modèle d'architecture de Seeheim [Gre85] a été le premier à établir clairement la séparation entre l'interface et le noyau fonctionnel.
Comme le montre la figure.2.7, cette interface est composée de trois unités fonctionnelles :

1. Le *Noyau Fonctionnel (NF)* qui regroupe le concept et les fonctions du domaine,
2. la *Présentation (P)* qui a pour principal rôle de rendre perceptible l'état des concepts du domaine et ainsi permettre la manipulation par l'utilisateur,
3. le *Contrôleur de Dialogue (CD)* qui sert de pont d'indirection entre le Noyau Fonctionnel et la Présentation. Il est également responsable de la gestion des relations entre ces deux unités.

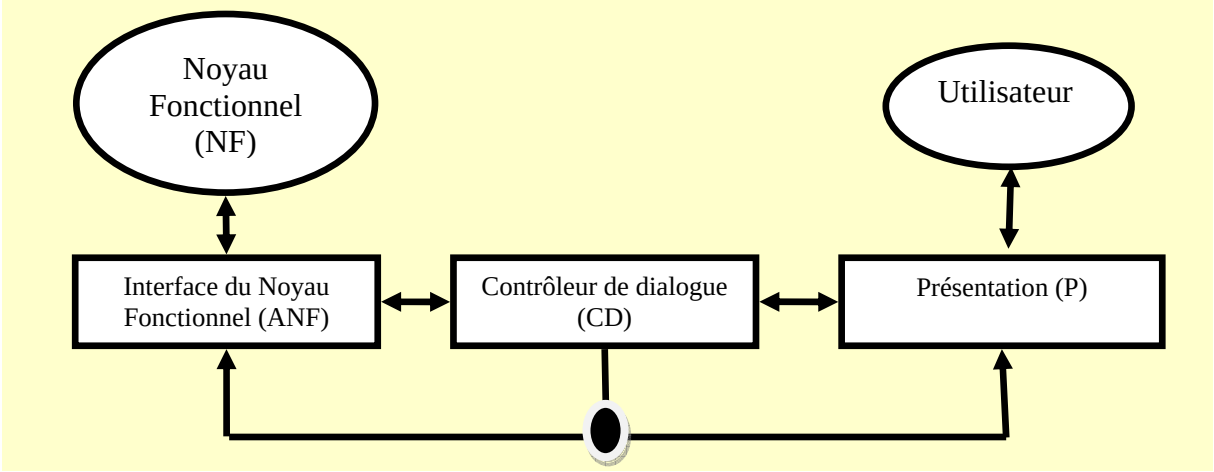


Figure 2. 7. Le modèle de référence de base pour les systèmes interactifs : modèle de Seeheim

II.3.1.2 Le modèle de référence Arch ou Seeheim révisé

Le modèle Arch [BFL+92] est un affinement du modèle de Seeheim cité précédemment. On y trouve cinq composants organisés sous forme d'une arche présentés en figure.2.8 : le Noyau Fonctionnel (NF), l'Adaptateur de Domaine (AD), le Contrôleur de Dialogue (CD), le Composant de Présentation (CP) et enfin, le Composant d'Interaction (CI).

Le **Noyau Fonctionnel** implémente les concepts du domaine indépendamment de leur présentation. Les structures de données manipulées par ce composant sont les objets du domaine. Le Composant d'Interaction est en contact direct avec l'utilisateur.

L'**Adaptateur de Domaine** implémente les tâches relatives au domaine dans lesquelles l'utilisateur intervient. Il présente une surcouche des objets du domaine permettant ainsi leur manipulation au sein du contrôleur de dialogue. Il est également chargé de transformer les données du Contrôleur de Dialogue en données de l'application.

Le **contrôleur de dialogue** est la clef de voûte de l'arche. Il autorise et gère l'enchaînement des tâches et assure le lien entre le Composant de Présentation et l'Adaptateur de Domaine.

Celui-ci permet d'ajuster la différence de modélisation des objets conceptuels entre les deux composants qui l'entourent.

Le **Composant Présentation** permet de définir une boîte à outils virtuelle qui est concrétisée par le Composant Interaction.

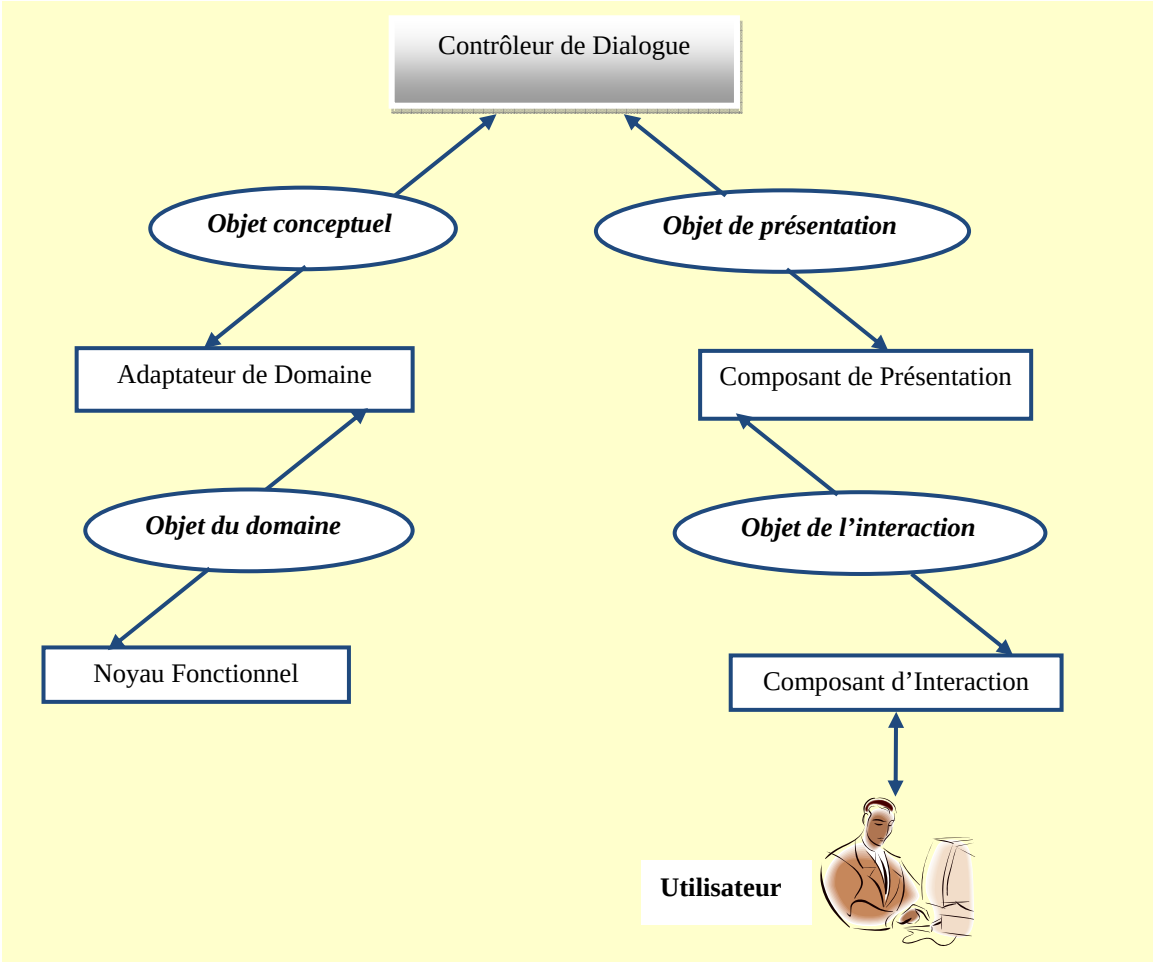


Figure 2. 8. Les composants du modèle ARCH

II.3.2 Les modèles multi-agents

Afin de structurer de manière plus fine les IHM, de nombreux modèles relevant de l'approche multi-agents ont été proposés. Nous donnons ci après les principes généraux et présentons le modèle MVC (Model-View-Controller), le modèle PAC (Présentation-Abstraction-Contrôle), ainsi que le modèle AMF (Agents multi-facettes).
Notons que tous ces modèles se basent sur la notion d'agents logiciels qui communiquent entre eux. Un agent est défini comme un système de traitement de l'information qui se distingue par [CN01] :

- Un jeu d'opérations,
- des mécanismes d'entrées/sorties,
- un état interne.

En IHM, nous parlons d'agents « simples » et non pas d'agents intelligents au sens large lié à l'Intelligence Artificielle. Le comportement de ces agents est surtout dicté par les interactions de l'utilisateur (directement ou indirectement pas la communication avec les autres agents) : on parle donc généralement d'agents réactifs pour les distinguer des autres qui sont appelés agents cognitifs [Tar97].

Ces agents sont structurés en facettes fonctionnelles qui décomposent et structurent l'agent en définissant un vocabulaire d'éléments conceptuels (agents, facettes, communication par message, etc…) et une certaine sémantique précisant les règles de composition et de communications entre agents et les rôles que les agents ont dans le modèle.

II.3.2.1 Le modèle MVC (Model-View-Controller)

Ce modèle a été développé au départ comme un modèle de programmation des interfaces pour le langage Smalltalk [KP88]. Il s'agit d'un premier modèle où le contrôle d'interface n'est pas centralisé mais répartie. Ces objets sont divisés en trois catégories : modèle, vue et contrôleur (figure.2.9) :

- Le **modèle (M)** représente les structures de données de l'application et les accès à ces informations. Il est le seul à même de communiquer avec les autres modèles de l'application.
- Le **modèle vue (V)** offre une représentation en sortie au niveau de l'interface utilisateur (affichage, son, haptique, etc). Elle gère les tâches graphiques de sortie. Elle est la représentation externe du modèle et utilise les services du modèle pour visualiser les données de ce dernier. C'est d'elle que dépendent la représentation et l'aspect des données du modèle. La dissociation vue/modèle permet à un modèle de posséder plusieurs vues.
- Le **modèle contrôleur (C)** réalise l'interface entre les modèles, les vues associées et les entrées de l'utilisateur. Il gère aussi l'interaction avec les autres contrôleurs.

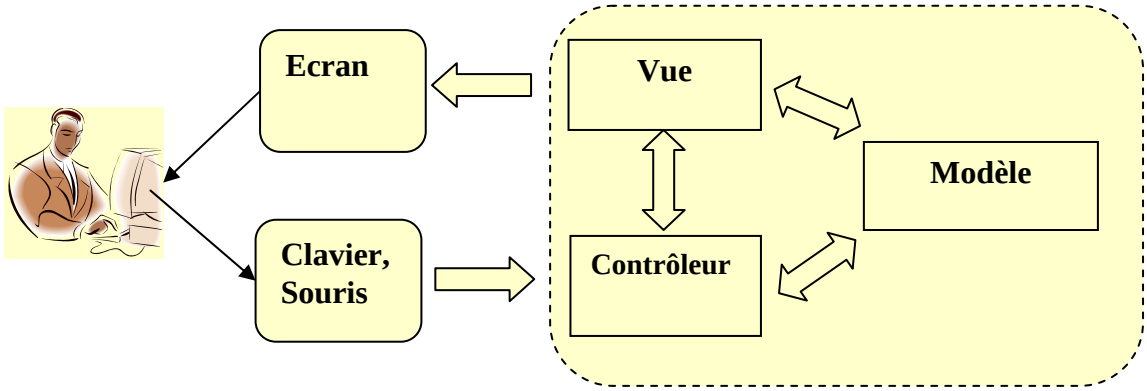


Figure 2. 9. Le modèle MVC

II.3.2.2 Un agent PAC : un agent à facettes

Un agent PAC constituant de systèmes interactifs, est un système interactif. Ce modèle introduit pour la première fois par J. Coutaz [Cou87] [Cou88] se modélise selon ces trois perspectives complémentaires : la Présentation, l'Abstraction et le Contrôle (figure.2.10) :

- La **facette Présentation (P)** qui définit l'interface utilisateur et interprète les entrées et sorties générées par l'utilisateur au cours de l'interaction,

- la **facette Abstraction (A)** qui gère les concepts du domaine et définit la compétence de l'agent indépendamment de la présentation,
- la **facette Contrôle (C)** qui, d'une part, fait le lien entre les facettes Abstraction et Présentation et qui, d'autre part, assure et gère les relations avec les autres agents dans la hiérarchie (l'agent père et les agents fils). Les agents communiquent entre eux uniquement à travers cette facette Contrôle. Le contrôle a double rôle : il sert de pont entre les facettes Présentation et Abstraction de l'agent, et il gère des relations avec d'autres agents PAC. Tout échange d'informations entre l'Abstraction et la Présentation s'effectue *via* le Contrôle. C'est aussi par leurs parties Contrôle que deux agents PAC communiquent.

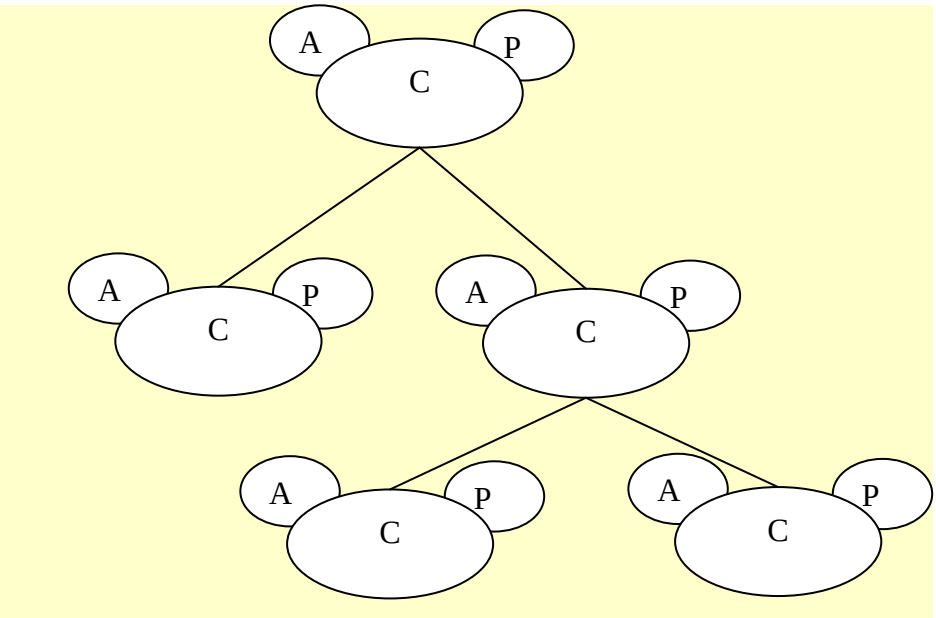


Figure 2. 10. Le modèle PAC

II.3.2.3 Le modèle AMF élémentaire

AMF est un modèle architectural mis au point pour la première fois par K.Ouadou [Oua94]. Il a par la suite été étendu au travail collaboratif AMF-C collaboratif par B.Tarpin [Tar97] [Tar99]. Le modèle AMF propose une décomposition des agents interactifs plus fine que PAC.

Ce modèle part de deux critiques sur le modèle PAC :

1. La décomposition Abstraction/Présentation est généralement insuffisante pour des applications complexes. Des fonctionnalités se retrouvent mélangées dans des composants trop macroscopiques alors qu'elles relèvent de thématiques différentes.
2. La structure de la facette Contrôle est peu formalisée. Or cette facette est la clef de voûte des modèles d'architecture.

Dans le modèle PAC, la décomposition Abstraction/Présentation est généralement insuffisante pour des applications complexes. Des fonctionnalités se retrouvent mélangées dans des composants trop macroscopiques alors qu'elles relèvent de thématiques différentes.

Le modèle AMF comme montré dans la figure.2.11 reprend les mêmes facettes de base que celles d'un agent PAC (Abstraction, Contrôle et Présentation) mais permet d'en ajouter de nouvelles facettes ce qui permet un découpage plus fin des agents interactifs.
On peut avoir de nouvelles facettes provenant d'une décomposition fine de la facette contrôle, de la duplication des facettes classiques (par exemple, plusieurs facettes présentation), ou pour modéliser de nouveaux aspects des agents (par exemple, facettes « Aide » ou « Erreur », « modélisation de l'utilisateur », « gestion de la coopération », etc.) Chaque facette se voit donc attribué un rôle précis ce qui conduit à une meilleure modélisation. Cela permet également la constitution de « patterns » d'autant plus réutilisables qu'ils sont stéréotypés. Aussi, le modèle AMF peut modéliser la facette contrôle tout en représentant les échanges entre les différentes facettes de l'agent. Ce second avantage répond à la seconde critique montré sur le modèle PAC. La facette Contrôle se trouve ainsi précisément modélisée dans son comportement. Il est donc facile de passer du modèle au logiciel lui-même en faisant l'instanciation de ce modèle dans le contrôleur du dialogue. Ceci est accompli par la notion de « moteur AMF ». Le formalisme graphique utilisé pour modéliser la facette contrôle peut ainsi être vu comme un véritable langage de programmation visuelle du contrôleur de dialogue de l'application elle-même

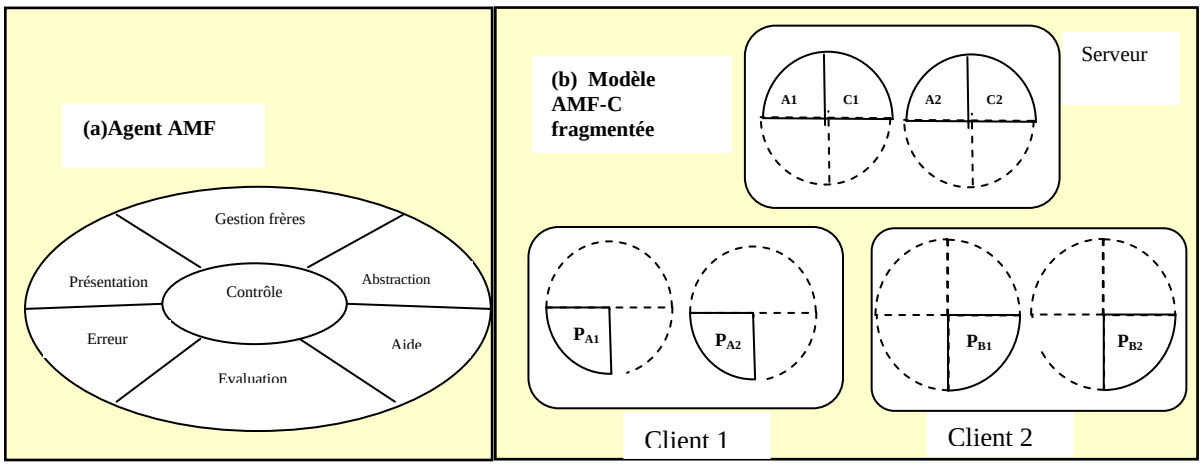


Figure 2. 11. Le modèle AMF

II.3.3 Les modèles hybrides

II.3.3.1 Le modèle PAC-Amodeus

Le modèle PAC-Amodeus se veut plus pratique que PAC tout en conservant son aspect conceptuel. Comme le montre la figure.2.12, cette architecture est le rapprochement entre les composants des deux modèles ARCH et PAC [Nig94]. L'apport essentiel de ce nouveau modèle vient de l'incorporation d'une hiérarchie d'agents PAC dans la clé de voûte de l'édifice: le contrôleur de dialogue.
Les rôles de ce dernier sont multiples:

- Enchaînement des tâches.

- Transformation du formalisme.
- Mise en correspondance entre le monde des concepts et celui de l'interface.
- Gestion d'une interaction coopérante.

Le *Noyau Fonctionnel* (NF) du modèle PAC-Amodeus comprend toutes les données informatiques propres au domaine d'application. Il réalise les concepts du domaine en ignorant la façon dont les concepts sont rendus perceptibles à l'utilisateur. Il permet aussi l'échange des concepts du domaine ou objet du domaine avec l'adaptateur du noyau fonctionnel [Nig 94].

L'Adaptateur de Noyau Fonctionnel ANF réalise l'interface logicielle entre le Noyau Fonctionnel (NF) et le *Contrôleur de Dialogue* (CD) permettant ainsi au Contrôleur de Dialogue CD d'être indépendant du NF.

Le *Contrôleur de dialogue* CD met en correspondance les concepts manipulés par l'utilisateur dans l'interface avec les concepts informatiques manipulés par le NF. Il est également chargé de gérer l'enchaînement des tâches

Le modèle PAC-Amodeus impose des contraintes de communication qui sont : un agent communique verticalement avec d'autres agents via sa facette C (contrôle). Les facettes A et P (resp, Abstraction et Présentation) d'un agent communiquent entre elle à travers la facette C de l'agent comme dans PAC, *via* sa facette A, un agent communique avec un objet conceptuel de l'ANF. Symétriquement, il communique avec un objet de présentation via sa facette P.

L'illustration de la figure 2.13 est une vue conceptuelle. En réalité, un agent peut ne pas être relié à un objet conceptuel. Alors, il ne dépend pas du Noyau Fonctionnel mais participe par exemple à une réparation sémantique. Un agent a toujours une facette contrôle mais ses facettes Abstraction et Présentation peuvent être absentes. La facette A est absente lorsque l'agent est en correspondance directe avec un objet conceptuel. Afin d'éviter des duplications d'informations, la compétence abstraite de l'agent est reléguée dans l'objet conceptuel et l'abstraction se limite à l'identification de l'objet conceptuel. La facette Présentation est absente lorsque l'agent est utilisé comme unité de calcul ou de contrôle. De tels agents ne peuvent alors être des feuilles de la hiérarchie. Un agent feuille a toujours une Présentation.

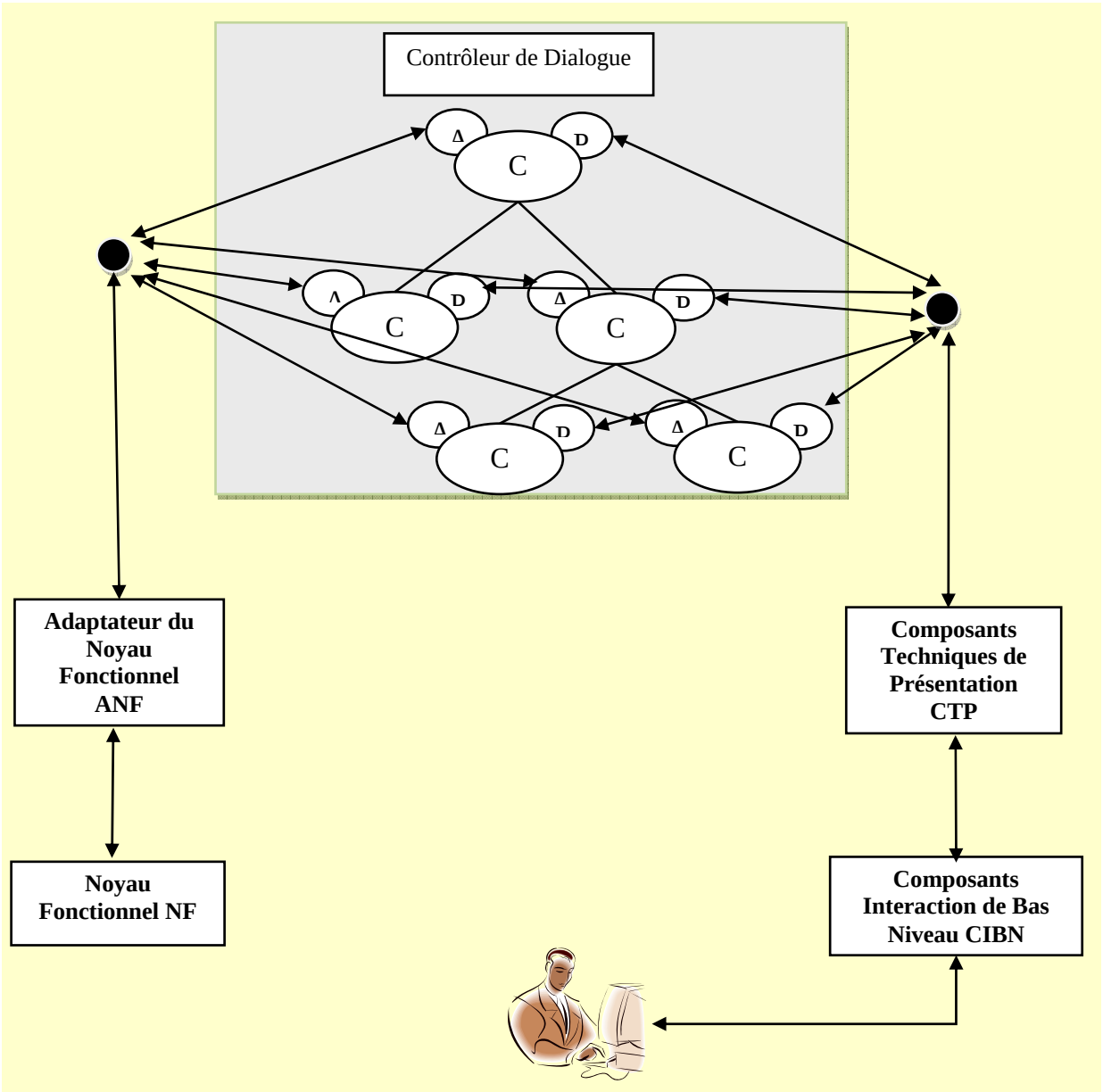


Figure 2. 12. Le modèle hybride PAC-Amodeus (d'après [Nig94])

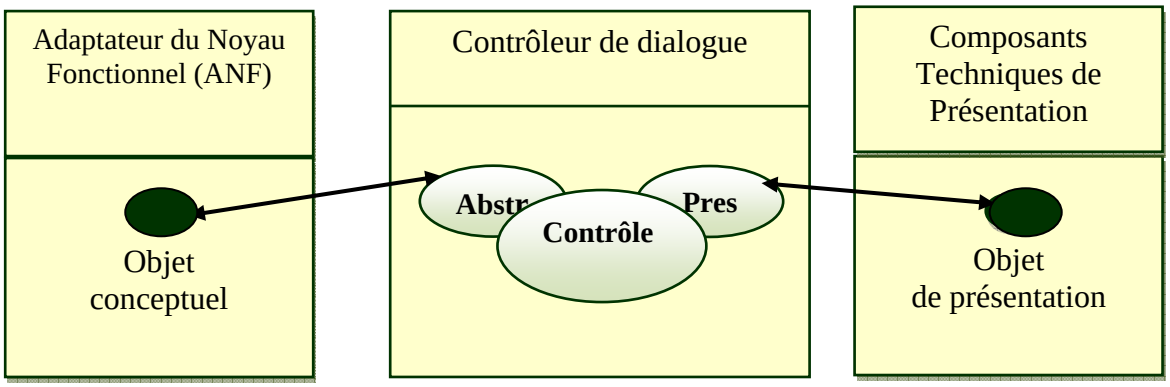


Figure 2. 13.Un agent PAC du contrôleur de dialogue.

L'intérêt du choix du modèle PAC-Amodeus

Les intérêts du modèle d'architecture PAC-Amodeus qui a motivé notre choix sont les suivants [DTN01] :

– Une structuration logique du code: c'est une architecture qui force le programmeur à suivre certains schémas. Le code produit est alors plus lisible et plus compréhensible par toute personne connaissant le principe de l'architecture PAC-Amodeus.

– La modularité globale: il y a une séparation nette et précise entre le noyau fonctionnel et la présentation externe de l'application. En effet, il existe des barrières d'abstraction entre le noyau fonctionnel, le contrôleur de dialogue et les outils graphiques utilisés.

– La modularité du contrôleur de dialogue: chaque agent est un module, par ailleurs nous retrouvons des adaptateurs spécifiques à chaque présentation. Ainsi le contrôleur de dialogue ne dépend pas des outils graphiques utilisés.

– La modifiabilité globale: grâce à la séparation entre le noyau fonctionnel et la présentation externe de l'application, il est plus facile de modifier l'un ou l'autre. Par exemple, toute modification du noyau fonctionnel se répercutera éventuellement sur l'adaptateur du noyau fonctionnel, mais le reste de l'arche reste inchangé. Il en est de même si les outils graphiques sont modifiés.

– La modifiabilité du contrôleur de dialogue: il est possible de modifier un agent sans avoir de répercussion sur le reste de la hiérarchie PAC.

Synthèse sur la portée des modèles d'architectures logicielles sur les systèmes de réalité augmentée

Nous avons présenté dans le paragraphe 4 de ce chapitre les trois modèles d'architectures logicielles : les modèles à couches, les modèles hybrides et les modèles multi-agents. Le modèle PAC-Amodeus est un modèle hybride qui combine le modèle Arch avec une approche multi-agent. Cette combinaison se traduit par un Contrôleur de Dialogue peuplé par une hiérarchie d'agents PAC.

Ces trois modèles d'architectures logicielles sont utilisés lors de la phase de conception logicielle dans le cycle de vie d'un système interactif pour en concevoir l'architecture. La phase de conception logicielle globale consiste à traduire les spécifications externes sous forme logicielle en appliquant un modèle d'architecture logicielle. Cependant, il n'existe pas de solution globale. Notre contribution pour la réalisation logicielle des systèmes de RA est d'adapter le modèle d'architecture logicielle PAC-Amodeus pour les systèmes de RA et ainsi prendre en considération les aspects liés aux objets réels et aux objets virtuels et à l'interaction de l'utilisateur avec ces objets.

II.4 Conclusion

Nous avons abordé dans ce chapitre les différents modèles pour l'Interaction Homme-Machine.
Le modèle d'interaction de Norman est un modèle conceptuel qui ne peut être directement utilisé dans la conception de systèmes de RA.
L'interaction instrumentale semble intéressante car elle fait intervenir explicitement l'utilisateur avec le système informatique pour la conception d'interfaces. Ce modèle qui introduit la notion d'instrument comporte le périphérique physique et la partie logicielle représentée à l'écran introduit en partie la notion de la RA.
Le modèle DPI propose quant à lui le concept d'instrument et introduit la notion de la RA en considérant uniquement les documents numériques. La théorie de l'activité médiatisée est un modèle par l'instrument qui provient des sciences humaines. Il introduit également le sens d'*instrument* mais il est difficile à appréhender pour les concepteurs des systèmes informatiques.
Le modèle d'interaction physique est particulièrement pertinent pour distinguer les différents cas d'interaction avec le monde physique et les données issues du monde numérique. Cependant ce modèle n'est guère opérationnel car il n'y a pas de formalisme associé permettant de modéliser une application concrète.
Les modèles ASUR et IRVO apparaissent pertinents et bien adaptés aux systèmes de RA. Ils permettent de décrire un système de RA et mettre en évidence les différentes entités composant le système. Cependant, ils présentent certaines limitations. Par conséquent, nous proposons notre modèle basé sur la notation UML.
Les modèles d'architectures logicielles tels que les modèles à couche et les modèles multi-agents ignorent les objets réels. Les dispositifs d'interaction sont implicitement pris en compte. Nous proposons dans le chapitre III nos propositions d'extension du modèle PAC-Amodeus dans la modélisation de l'architecture du système.

L'intelligence est la faculté à l'aide de laquelle nous comprenons finalement que tout est incompréhensible.
(La Vie des termites)
—Maeterlinck, Maurice

Chapitre III

Outils de conception et de réalisation logicielles de système de réalité augmentée

Introduction

Nous avons présenté au chapitre précédent, les modèles d'interaction selon deux axes différents mais complémentaires, les modèles d'interactions qui guident la conception des interfaces, et les modèles d'architectures qui décrivent les éléments fonctionnels pour l'implémentation de l'interface.
La solution avancée dans ce chapitre est une adaptation d'un modèle d'architecture logicielle, la modèle Pac-Amodeus pour la réalisation des systèmes de RA pour l'aide à la maintenance. La mise en place du modèle d'architecture logicielle a conduit à établir une correspondance entre les composants logiciels du modèle et les entités et relations UML. Nous proposons ainsi un cadre conceptuel générique à la réalisation logicielle.
Ce chapitre est donc structuré ainsi : nous analysons tout d'abord, et ce de manière détaillée les éléments de conception et de réalisation d'un système interactif en les situant dans un cycle de vie logiciel. Nous présentons ensuite les propriétés ergonomiques spécifiques aux systèmes de RA. Reposant sur ces propriétés, nous détaillons notre démarche d'analyse ergonomique qui s'appuie sur la notation UML. Nous terminons notre chapitre par la présentation du modèle d'architecture PAC-Amodeus que nous adaptons à la réalisation de notre système de RA.

III.1 Eléments de conception et de réalisation d'un système interactif

Le cycle de vie d'un logiciel désigne toutes les étapes de développement d'un logiciel, de sa conception à sa disparition. L'objectif d'un tel découpage permet de définir des jalons intermédiaires permettant la validation du développement logiciel, c'est-à-dire la conformité du logiciel avec les besoins exprimés, et la vérification du processus de développement, c'est-à-dire l'adéquation des méthodes mises en œuvre [Nig01]. L'origine de ce découpage provient du constat que les erreurs ont un coût d'autant plus élevé qu'elles sont détectées tardivement dans le processus de réalisation.
Aussi, le processus de développement nécessite un cadre structurel qui gère et supervise toutes les phases de conception et de réalisation du système et en spécifie les étapes clés. De nombreux modèles ont été élaborés afin de répondre aux besoins de développement. Chacun d'eux a ses propres spécificités. Les plus répandus de nos jours sont le modèle en cascade, le modèle en spirale et le modèle en V [Nig94].

III.1.1 Le modèle de cycle en cascade

Ce modèle de cycle de vie a été mis au point en 1966, puis revisité dans les années 70 par Royce [Roy70]. Ce modèle fut ensuite affiné sous diverses formes avec notamment le modèle en V [MR84] puis, plus récemment, le modèle en spirale [Boe88] que nous verrons dans les sections 1.2 & 1.3.
Le principe de ce modèle est très simple. Chaque phase se termine à une date précise par la production de certains documents ou logiciels. Les résultats sont définis sur la base des interactions entre étapes, ils sont soumis à une revue approfondie et on ne passe à la phase suivante que s'ils sont jugés satisfaisants. Le modèle original ne comportait pas de possibilité de retour en arrière. Celle-ci a été rajoutée ultérieurement sur la base qu'une étape ne remet en cause que l'étape précédente, ce qui, dans la pratique, s'avère insuffisant (figure 3.1).

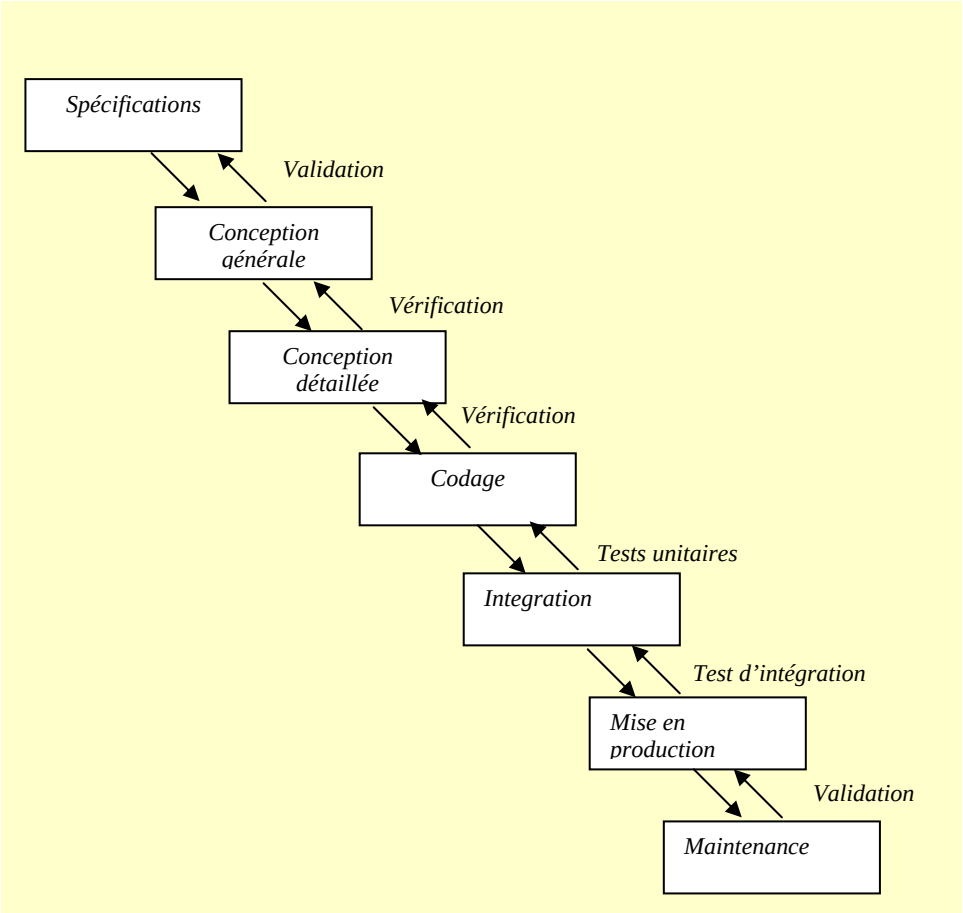


Figure 3. 1. Modèle de cycle de vie en cascade [Roy70]

III.1.2 Le modèle de cycle en spirale

Ce modèle [Boe81] est beaucoup plus général que le précédent et surtout plus récent. Il date du milieu des années 80. Comme le montre la figure.3.2, pour chaque cycle de spirale (ou phase) le modèle rend explicites quatre activités fondamentales: 1) l'identification des objectifs de la phase, l'alternative pour atteindre ces objectifs et leurs contraintes, 2) l'analyse et la résolution des risques, 3) le développement et la vérification/validation de l'objet de la phase, 4) la planification de la phase suivante. Chaque phase définit une étape en direction du produit final. Sa nature dépend du cas à traiter. Par exemple, la phase initiale peut correspondre à l'étude de faisabilité dont l'analyse des risques conduits à la décision de développer un prototype. La seconde phase peut être la production et la validation du cahier des charges de ce prototype suivi d'un plan de développement. Notons que l'analyse des risques de cette phase a pu mettre en évidence la nécessité de valider un sous-ensemble du cahier des charges par une maquette (on assiste alors à une mini-spirale au sein de la phase).

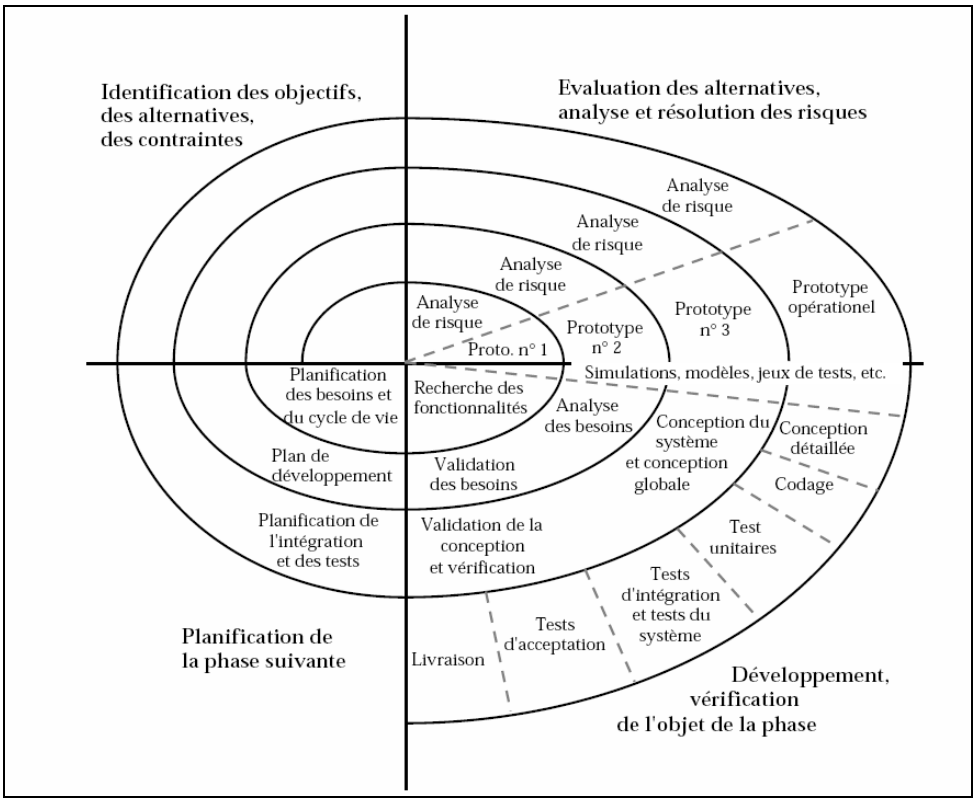


Figure 3. 2. Le modèle de cycle de vie en spirale (image prise de [Boe81])

III.1.3 Le modèle de cycle en V

Le modèle de cycle en V [MR84] est le cycle de vie le plus répandu et le plus utilisé. Son principal avantage étant de spécifier les étapes clefs de tout processus de développement de la conception à la réalisation.

Ce modèle explicite et structure les activités de tests. Parmi ces activités, on différencie la *validation* de la *vérification* [Boe81].

La validation s'interroge sur l'adéquation du logiciel produit « *construisons nous le bon produit ?* », tandis que la vérification concerne la conformité du produit avec la description « *construisons-nous le produit concerné ?* »

Outre les étapes de validation et de vérification, les étapes du cycle en V représentées à la figure.3.3 peuvent être organisées selon deux catégories : les étapes relevant de l'espace IHM, c'est-à-dire les étapes de l'évaluation ergonomique du système et d'élaboration d'un modèle d'interaction répondant à des requis identifiés à l'issue de l'étape d'analyse des besoins, et les étapes relevant de l'espace logiciel, c'est-à-dire les étapes de conception et de développement logiciels.

L'*évaluation ergonomique*, comme le montre la figure 3.3, intervient dans toutes les étapes du cycle. Son principal rôle est d'identifier et de corriger les erreurs de conception pouvant nuire à l'utilisabilité et à l'utilité du futur système.

L'analyse des besoins consiste à définir les besoins afin de produire un logiciel qui réponde aux attentes des utilisateurs [Ali98]. Les résultats de cette étape sont consignés dans un cahier des charges.

L'étape de la *conception du système* à pour objectif de définir la solution matérielle et logicielle qui répond à l'analyse des besoins. Elle comprend deux volets essentiels: la *conception* proprement dite, et les *conceptions globale et détaillée*. La *conception* permet d'établir la solution à mettre en oeuvre, alors que les conceptions globale et détaillée sont quant à elles orientées vers la réalisation logicielle. L'étape de *conception logicielle* est une étape en amont de la phase de codage. Cette étape consiste à construire l'architecture logicielle décrivant la structure du logiciel à développer ainsi que son comportement à l'exécution.
Le *codage* ou *implémentation* consiste à traduire les spécifications issues de l'étape de conception logicielle en un code exécutable.
Les *tests* se situent sur la pente ascendante du modèle en V. Ils représentent la dernière étape du cycle et permettent de vérifier et de valider les étapes précédentes par rapport au code produit. Les tests unitaires vérifient que les composants modulaires du système répondent chacun à leurs spécifications. Les tests d'intégration servent à vérifier que les modules réalisés indépendamment interagissent correctement. Les tests du système servent à vérifier que les éléments de la solution exprimés dans le dossier des spécifications sont présents.

Dans le modèle en V, les étapes pour tout système informatique passent par la conception à la réalisation [DNT02]. Il est donc judicieux d'affiner ces résultats dans le cadre de systèmes interactifs.
Dans la figure.3.3, nous avons situé les étapes de la conception ergonomique au sein du cycle en V. Celle-ci se décompose en cinq étapes : (1) esquisse du problème à résoudre, (2) identification de l'utilisateur, (3) définition des tâches et des objets spécifiques au domaine d'application, (4) définition des objets et fonctions informatiques et (5) définition de la présentation de l'interface :
Les deux premières étapes de la conception ergonomique, à savoir l'esquisse du problème à résoudre et l'identification de l'utilisateur participent à la définition du problème, étape contenue dans la phase de l'analyse du besoin du cycle en V. Ces deux phases s'appuient en général sur un questionnaire, des interviews et des observations des utilisateurs collectés sur les lieux de travail.
La définition des tâches et des objets spécifiques au domaine d'application font l'objet de la troisième étape de la conception ergonomique qui concerne la tâche que l'utilisateur doit réaliser. Il s'agit dans un premier temps de définir les objets et opérateurs du domaine puis de les organiser dans un arbre de tâches. La technique usuelle pour construire cet arbre est d'adopter une approche descendante de la tâche la plus abstraite aux tâches élémentaires manipulant des objets du domaine. Chaque tâche de l'arbre est ensuite décorée : ces attributs ont un impact direct sur la conception de l'interaction. Le modèle de tâche résultant de cette étape appartient à l'analyse des besoins, étape du cycle en V contribuant dans la définition des services requis.

La quatrième étape qui est la définition des objets et fonctions informatiques s'appuie sur l'étape précédente et comprend l'ensemble des concepts manipulés dans l'interaction. Chaque tâche que l'opérateur doit réaliser est traduite en termes de concepts manipulés dans l'interaction
La cinquième et dernière étape qui est la définition de la présentation de l'interface consiste à définir le comportement perceptible des objets informatiques. Le résultat de cette étape est une description de l'interaction en sortie, du système vers l'utilisateur et de celle en entrée, de l'utilisateur vers le système.
Les cinq étapes citées ne sont qu'une vue simplifiée du processus de conception ergonomique de l'interaction.
Dans la pratique, ces étapes sont soumises à chaque fois à des révisions suite à l'évaluation ergonomique située au centre du cycle en V de la figure 3.3**.** Celle-ci a pour principal objectif de traduire le fait que chaque étape doit faire l'objet d'une évaluation ergonomique.

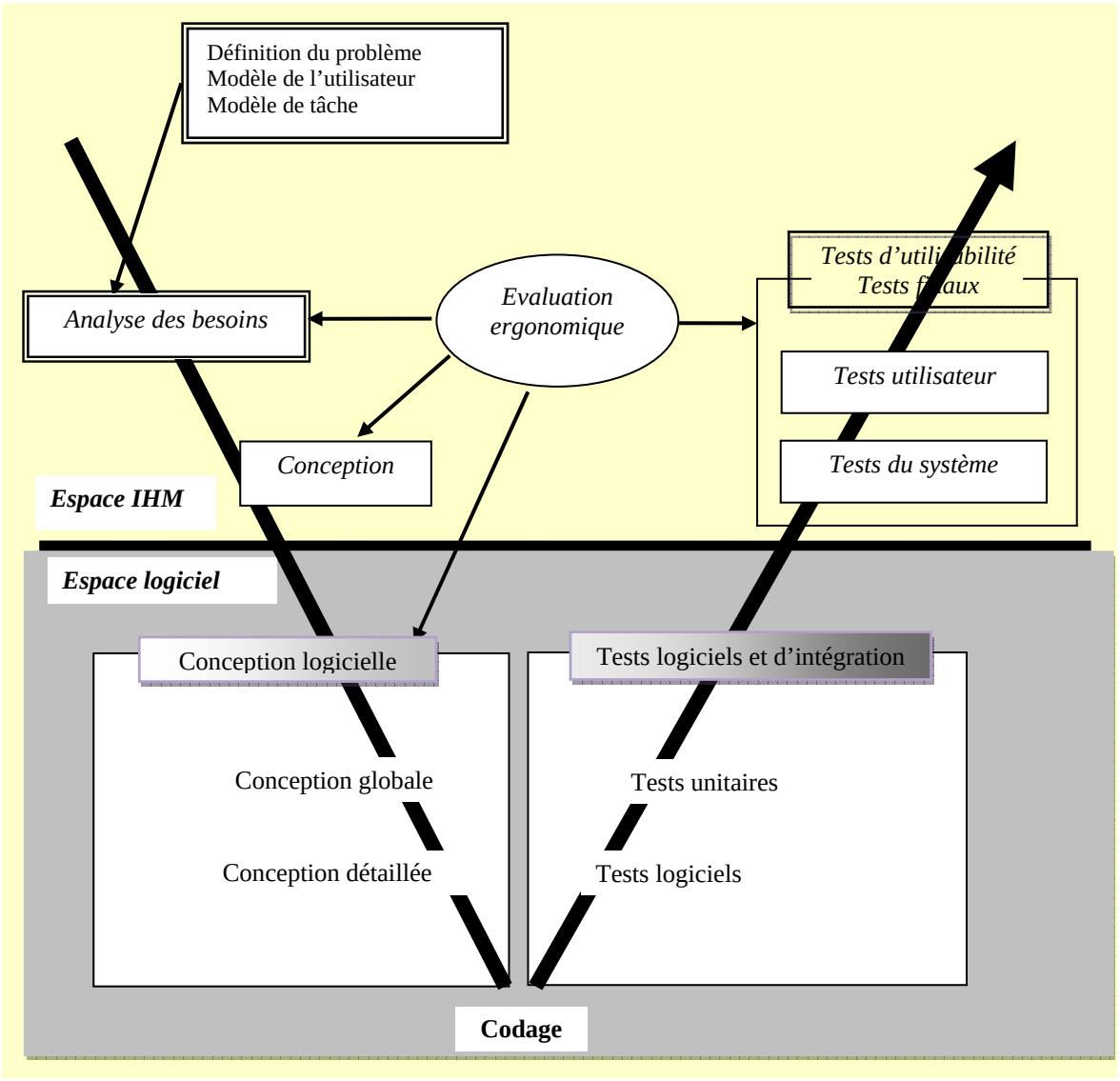


Figure 3. 3. Mise en relation des étapes du cycle de vie en V du logiciel et les étapes de conception de l'interaction [Nig94]

En résumé, dans le cadre de notre étude, la tâche principale attendue par le client est de concevoir et de réaliser un système interactif d'aide à la maintenance.
Quant à la définition des besoins, nous avons a cet effet conçu un système nommé *SVAM* (**S**ystème de **V**ision pour l'**A**ide à la **M**aintenance). Ses principales fonctions sont:

- Assister le technicien durant sa tâche de maintenance. Cette assistance se manifeste par l'envoi d'informations supplémentaires sous forme d'augmentations multimédias (Son, image et vidéo) directement superposées au monde réel. Cet aspect du système représente la facette RA du système.
- Concevoir de scénarios de maintenance pour des pannes données.
- Communiquer avec l'expert du service de maintenance.
- Permettre la sauvegarde de toute information pertinente. Pour ceci un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) est nécessaire. Ce point reflète l'aspect base de données (BDD) de notre travail.
- Gérer les données et planifier les actions par le biais d'un administrateur qui aura pour fonctions :
  - La gestion des scénarios (ajout, suppression et modification…).
  - La planification des ordres de réparation des pannes apparues.
  - L'administration de toutes les données propres à la maintenance (Outils, périphériques, techniciens…).

Outre les étapes de conception ergonomiques de l'interaction, il existe des modèles d'architectures logicielles propres aux systèmes interactifs.

Notre contribution à la conception des systèmes de RA réside dans une démarche de conception ergonomique. Dans cet axe, nous présentons dans le paragraphe 2 les propriétés ergonomiques. Nous proposons dans le paragraphe 3 l'étape de modélisation de notre système en introduisant la notation UML.

La phase de la conception logicielle du cycle en V utilise des modèles d'architecture logicielle. Ces modèles d'architecture occupent une situation importante entre la conception ergonomique et la conception logicielle. Notre contribution à la réalisation logicielle réside dans le modèle d'architecture logicielle qui est le modèle PAC-Amodeus que nous avons adapté à notre système conformément à nos besoins. Cette étude fera l'objet du paragraphe 5. Nous expliquons ses principes et les limites du modèle.

III.2 Propriétés ergonomiques d'un système de réalité augmentée

La particularité d'un système de RA réside dans la dualité de l'interaction induite par ces systèmes. En effet, l'interaction de l'utilisateur avec le

système se compose de deux facettes: l'une avec des entités virtuelles, l'autre avec des entités réelles, telles que les outils réels manipulés [Dub04].
Par conséquent, l'étude de l'utilisabilité du système doit tenir compte de cette spécificité. L'utilisabilité d'un système de réalité augmentée doit donc considérer les propriétés établies d'un système interactif, mais doit aussi étudier la combinaison des deux facettes de l'interaction [Gra96]. Garantir l'harmonie des deux facettes de l'interaction est donc un objectif supplémentaire à prendre en compte lors de l'étude de l'utilisabilité d'un système de RA.
A ces fins, l'approche adoptée pour répondre à cet objectif s'appuie sur des propriétés ergonomiques des IHM ainsi que sur celles proposées pour la conception de systèmes de RA. Ainsi, interagir avec un système interactif requiert une interprétation correcte par l'utilisateur des données produites par le système. Un point central de la conception d'une interface consiste à rendre perceptible des données pertinentes vis à vis de la réalisation de la tâche de l'utilisateur, et ce de manière correcte et facilement interprétable.
Deux propriétés ergonomiques du domaine des IHM caractérisant les sorties d'un système interactif: l'*observabilité* et l'*honnêteté* qui sont utilisées pour caractériser la présentation d'un concept manipulé par le système à un instant donné au cours de l'interaction:

– **L'observabilité**: elle caractérise la capacité du système à permettre à l'utilisateur de percevoir l'état interne du système au travers des données fournies par le système [ACN92] [DFA+98].

– **L'honnêteté**: elle caractérise quant à elle la capacité du système à fournir des données relatives à un concept manipulé, qui soient en accord avec l'état interne du système et de manière à favoriser une interprétation correcte de la part de l'utilisateur [ACN92].

Compte tenu de la dualité de l'interaction dans les systèmes de RA, les utilisateurs se trouvent fréquemment exposés à plusieurs sources de données: Un objet réel et sa représentation numérique, représentation simultanée de plusieurs concepts. La cohérence de ces différentes sources de données doit être garantie sans quoi l'utilisateur risque d'interpréter de manière erronée les données perçues.
Partant de ce constat, les deux propriétés considérées auparavant (honnêteté, observabilité) sont complétées par deux autres afin d'assurer et de garantir que la combinaison des données présentées simultanément fasse sens pour l'utilisateur [DNT02].

– **La compatibilité perceptuelle**: l'extension de la propriété de l'observabilité au cas de N concepts, traduit la possibilité pour l'utilisateur de percevoir les données relatives à N concepts en prenant en compte leur dispersion géographique dans l'environnement et le sens perceptif mis en jeu. La compatibilité perceptuelle implique donc l'observabilité de chacun des concepts considérés isolément.

– **La compatibilité cognitive**: l'extension de la propriété d'honnêteté au cas de N concepts traduit la capacité de l'utilisateur à interpréter correctement les données relatives à N concepts en considérant les différents

modes de représentation mis en oeuvre par le système pour représenter ces concepts. L'utilisateur est amené à percevoir plusieurs représentations relatives à un même concept. Ceci dénote une forme spécifique de compatibilité nommée continuité. Comme dans le cas de la compatibilité, cette propriété s'applique aux niveaux perceptuels et cognitifs.

– **La continuité perceptuelle**: l'adaptation de la compatibilité perceptuelle, traduit la possibilité pour l'utilisateur de percevoir les données relatives à un concept en prenant en compte leur dispersion géographique dans l'environnement et le sens perceptif mis en jeu.

– **La continuité cognitive**: l'adaptation de la compatibilité cognitive, traduit la capacité de l'utilisateur à interpréter correctement les données relatives à un concept en considérant les différents modes de représentation mis en oeuvre par le système pour représenter les données.

Ces propriétés ergonomiques caractérisent les capacités des systèmes, mais elles ne peuvent être considérées indépendamment de l'utilisateur : *Elles doivent être en accord avec les capacités de l'utilisateur*.
Les quatre propriétés ergonomiques citées dans ce paragraphe caractérisent l'utilisabilité d'un système de RA en prenant en compte la nécessité d'interprétation d'informations perçues dans les deux mondes virtuels et réels.
Enfin, notre principal objectif a été d'identifier des propriétés répondant à des caractéristiques de l'interaction qui soient propres aux systèmes dits de RA. Dans le paragraphe suivant, nous étudierons l'étape la conception logicielle l'une des étapes du cycle en V de la figure.3.3.

III.3 Espace de conception : la conception globale

Poursuivant le cycle de vie d'un système interactif issu du génie logiciel, nous abordons dans cette section, l'étape de la conception logicielle des systèmes de RA.
Le développement du logiciel se déroule en deux grandes étapes, comme indiqué à la figure.3.3: la phase de conception logicielle, qui se décompose elle-même en deux sous étapes de conception globale et détaillée, et la phase de réalisation logicielle. Cette approche est commune au développement de tout système interactif.
Nous allons à présent présenter notre démarche d'analyse pour la conception globale du système en s'appuyant sur les notations UML.

III.3.1 UML : un modèle d'interaction pour les systèmes de réalité augmentée

Les modèles d'Interaction Homme-Machine (IHM) sont principalement de deux sortes : les modèles d'interaction et les modèles d'architecture logicielles.

Les modèles d'interaction en IHM sont nombreux (chapitre II). Ils assument plus ou moins explicitement l'utilisation des périphériques classiques de type WIMP (Windows, Icon, Menus and Pointing devices). Dés que l'on considère des interfaces d'une autre nature comme pour celles des systèmes de RA, ces modèles montrent leur limitation à décrire complètement l'interface car certaines parties ne sont pas prises en compte tel que tous les aspects liés aux objets et outils réels.
Les modèles ASUR et IRVO sont deux modèles conçus pour des systèmes de RA. Cependant, ces modèles présentent des limites et ce sont ces limitations qui nous ont poussé à proposer un modèle basé sur les notations UML.
En effet, UML est désormais un standard dans le domaine de la conception logicielle des systèmes interactifs. De plus, le développement d'un système de RA nécessite l'étude de l'interaction mais aussi celle des fonctionnalités qui seront proposées par le système.
Pour établir une configuration logicielle de la plate-forme ARMIA nous avons utilisé deux types de diagrammes qui nous semblent les plus adéquats, les plus représentatifs et qui répondent bien au différentes contraintes. A cet effet, nous avons opté pour le diagramme des classes et le diagramme des composants.

III.3.1.1 Diagramme de classes

Le diagramme de classes exprime la structure statique du système. L'intérêt du diagramme de classes est de modéliser les entités du système d'information. Dans ce cas, les informations sont structurées, c'est-à-dire qu'elles sont regroupées dans des classes. Le diagramme met en évidence d'éventuelles relations entre ces classes.
Le diagramme de classes comporte 6 concepts :
- classe
- attribut
- identifiant
- relation
- opération
- généralisation / spécialisation.

III.3.1.2 Notions utilisés dans le diagramme des classes

a. Notion de classe

Une classe est une description abstraite (condensée) d'un ensemble d'objets du domaine de l'application : elle définit leur structure, leur comportement et leurs relations.
Les classes sont représentées par des rectangles compartimentés (exemple ci-dessous):
- le 1er compartiment représente le nom de la classe
- le 2ème compartiment représente les attributs de la classe
- le 3ème compartiment représente les opérations de la classe

NOM CLASSE
Attribut_1 : int Attribut_2 : int Attribut_3 : int
Operation_1 () :void Operation_2 () :void

b. Notion de relation

S'il existe des liens entre objets, cela se traduit nécessairement par des relations qui existent entre leurs classes respectives. Les liens entre les objets doivent être considérés comme des instances de relations entre classes.
Il existe plusieurs types de relations entre classes :
- l'association
- la généralisation/spécialisation

Une association est une relation entre deux classes (association binaire) ou plus (association n-aire), qui décrit les connexions structurelle entre leurs instances. Une association n-aire possède n rôles qui sont les points terminaux de l'association ou terminaisons (Figure 3.4.).



Figure 3. 4. Exemple d'une association binaire

c. Multiplicité ou cardinalité

La multiplicité associée à une terminaison d'association, d'agrégation ou de composition déclare le nombre d'objets susceptibles d'occuper la position définie par la terminaison d'association. Voici quelques exemples de multiplicité :

Un et un seul : 1
Zéro ou un : 0..1
De M à N (entiers naturels) : M..N
De zéro à plusieurs : 0..*
De 1 à plusieurs : 1..*

d. Agrégation

Dans UML, l'agrégation n'est pas un type de relation mais une variante de l'association. Une agrégation représente une association non symétrique dans laquelle une des extrémités joue un rôle prédominant par rapport à l'autre extrémité.

Une agrégation est une association qui représente une relation d'inclusion structurelle ou comportementale d'un élément dans un ensemble. Graphiquement, on ajoute un losange vide du côté de l'agrégat (Figure 3.5). Contrairement à une association simple, l'agrégation est transitive. L'exemple de la figure 3.5 montre que l'on veut gérer une classification de véhicules. Chaque véhicule est classifié selon son type.



Figure 3. 5. Exemple de relation d'agrégation

III.3.1.3 Diagramme des composants

Un composant est un élément physique qui représente une partie implémentée d'un système. Il peut être du code (source, binaire ou exécutable), un script, un fichier de commandes, un fichier de données, une table, etc. Il peut réaliser un ensemble d'interfaces qui définissent alors le comportement offert à d'autres composants.
En outre, chaque composant peut posséder des attributs et des opérations. Un composant est éventuellement connecté à d'autres (via des dépendances ou des compositions).
Dans un cas général, un composant est représenté par un rectangle principal avec sur son côté gauche deux petits rectangles. Le nom du composant est placé dans le rectangle principal (Figure 3.6).

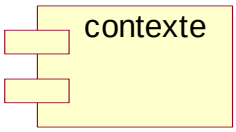


Figure 3. 6. Représentation d'un composant

Un composant est défini comme une sous-classe de **Classificateur**. Il peut ainsi avoir des attributs, des opérations et participer à des relations (association, généralisation, dépendance).
UML définit 5 stéréotypes aux composants :
- « « document » » : un document quelconque ;
- « « exécutable » » : un programme qui peut s'exécuter ;
- « « fichier » » : un document contenant un code source ou des données ;
- « « bibliothèque » » : une bibliothèque statique ou dynamique ;
- « « table » » : une table de base de données relationnelle.

La communication inter-composants

Les divers composants d'un système doivent être sujet à composition avec d'autres composants. Ceci se fait par le biais d'un mécanisme de communication. Les liens qui peuvent exister entre les composants

s'appellent alors connections. Suivant le système de composants, nous pouvons avoir plusieurs types de liens. A titre d'exemple, nous citons
– Les appels de procédure,
– Les évènements,
– Les flux de données.
Nous avons exposé précédemment deux types de diagrammes pour établir une représentation logicielle de notre plate-forme.

III.3.2 Les entités

Un système informatique pouvait se limiter à la mise en présence d'un ordinateur et un utilisateur. Cependant, les systèmes actuels tels que les systèmes de RA ont pleinement démontré que ce type de configuration est dépassé (obsolète) et ne peuvent plus se contenter du couple ordinateur-utilisateur.
A cet effet, nous avons mis en évidence en utilisant les notations UML cinq types d'entités :

- L'utilisateur ou les utilisateurs lorsqu'il s'agit de systèmes collaboratifs.
- Les adaptateurs d'entrée (Ain) et de sortie (Aout)
- Les objets manipulables et perceptibles par les utilisateurs : les machines et les outils
- L'entité SCEU (Système de Collaboration Entre Utilisateurs) pour les systèmes collaboratifs entre utilisateurs.
- L'entité *Formation* pour tout l'aspect formation des opérateurs de maintenance.

III.3.3 Modélisation globale de la plate-forme ARIMA

Dans cette section, nous présentons les différentes entités mises en jeu dans la plate-forme *ARIMA* et les relations existantes entre elles [ZZA06a].
Dans ce système, les premières entités qui apparaissent sont: le *Technicien* et la *Machine.* Le technicien manipule la machine à travers des entités *outils*. Les adaptateurs d'entrée et de sortie sont des éléments de notre notation qui réalisent une passerelle entre le monde réel et le monde informatique. Les adaptateurs d'entrée notés A_{in} « Adaptateur In» sont des dispositifs d'entrée (une souris, un micro, une pédale de commande…) qui permettent de transmettre des données du monde réel vers le monde informatique. L'utilisateur peut ainsi agir sur le système via ces adaptateurs en contrôlant par exemple l'enchaînement des étapes d'un scénario de maintenance, d'où l'association suivante: *Utilisateur* – A_{in}.
Les adaptateurs A_{out} «Adaptateur Out » sont des dispositifs de sortie (un écran, un casque de RA, des haut-parleurs, un vidéo projecteur) qui permettent de transmettre des données du monde informatique vers le monde réel. L'utilisateur perçoit ainsi les données que lui envoie le système via ces adaptateurs A_{out} d'où l'association suivante: A_{out} – *Utilisateur.*

Les relations connectées à un adaptateur d'entrée ou de sortie (A_{in} ou A_{out}) définissent l'interaction de l'utilisateur avec le monde virtuel.
Le technicien est assisté durant sa tâche de maintenance. Cette assistance se manifeste par l'envoi d'augmentations multimédia par le biais d'adaptateurs de sortie A_{out}.
La tâche de maintenance est associée à une panne donnée dont le diagnostic est transmis par un expert à notre système informatique. Celui-ci se charge de l'affichage des augmentations via des dispositifs de sortie A_{out} .
La compatibilité et la continuité ont donc trait à l'interaction de l'utilisateur avec le système du point de vue des sorties proposées par le système. Etudier la compatibilité ou la continuité nécessite donc l'analyse des relations UML à destination de l'utilisateur d'une part, et d'autre part des composants à partir desquels l'utilisateur obtient les données. Les composants UML étudiés sont donc les adaptateurs de sortie (A_{out}) ainsi que les objets réels utilisés comme outil ou ayant le rôle d'objet de la tâche.
La figure 3.7 présente le diagramme global des classes [ZZA05].

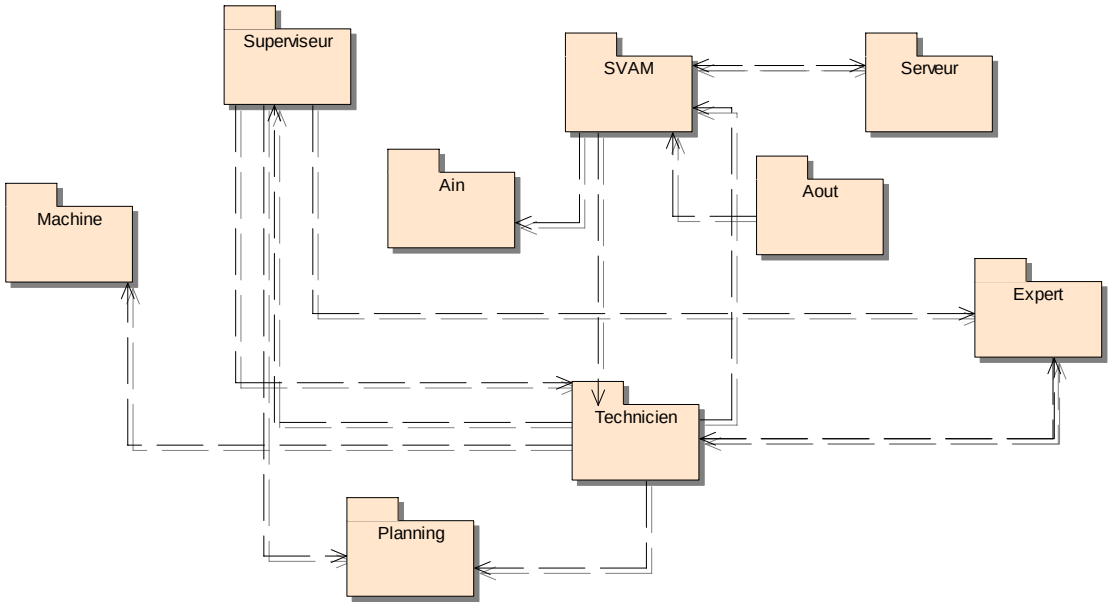


Figure 3. 7. Diagramme global des classes mettant en évidence les différents paquetages de la plate-forme et les relations entre eux.

III.3.3 Détail des différentes entités

Nous allons à présent détailler le contenu de chaque paquetage afin de mieux comprendre le comportement de notre plate-forme.

- **Le paquetage technicien** : Le technicien est considéré comme la personne auquel est confiée l'opération d'intervention. Il est en interaction avec plusieurs entités pour accomplir sa tâche dans de bonnes conditions. En cas de difficultés, il se met en interaction avec l'expert pour recevoir

les scénarios d'intervention, via le système SVAM dans le moment et l'endroit voulu.

- **Le paquetage Machine**: Toute la plate-forme a pour objectif principal de veiller au bon état de la machine (réparation, entretien,…). La classe « Machine » est donc indispensable pour permettre au technicien d'effectuer les interventions nécessaires. Signalons que plusieurs techniciens peuvent intervenir sur une même machine. Ceci fait appel au travail collaboratif.
- **Le paquetage Expert**: L'expert se charge d'aider le technicien lors de son intervention sur la machine concernée. L'expert accède en général à l'« Historique » de la machine et guide le technicien via des augmentations transmises au système SVAM. La collaboration entre le technicien et l'expert se fait par l'intermédiaire des outils de communication tel que le téléphone, l'email, le chat, le tableau blanc, la vidéo conférence, etc.
- **Le paquetage Serveur** : Un serveur est un ordinateur qui met ses ressources à la disposition d'autres systèmes informatiques sous la forme de services, qui peuvent être:
    - une bases de données
    - un accès à des périphériques (imprimantes, modems, …)
    - un courrier électronique
    - des traitements automatisés, …

  Dans notre cas, le serveur possède une base de données contenant toutes les informations nécessaires pour mener l'opération d'intervention. La base de données peut contenir les informations concernant entités suivantes :
    - les experts,
    - les techniciens,
    - les machines,
    - les augmentations,
    - les scénarios d'intervention,
    - les outils d'intervention,
    - l'historique,
    - les dispositifs de RA (entrées/sorties),
    - la société.
- **Le paquetages Aout et Ain :** ces deux adaptateurs réalisent une passerelle entre le monde réel et le monde informatique.
- **Le paquetage Planning :** Il comprend un tableau qui donne aux techniciens les différentes procédures d'intervention correspondantes à une machine particulière. Dans notre cas, chaque technicien possède sa propre session et accède, via un mot de passe, à son propre planning.
- **Paquetage Superviseur :** c'est un acteur chargé de la gestion de l'ensemble des techniciens. Sa fonction est de bien veiller au bon fonctionnement des machines. Le superviseur possède le privilège de

choisir le technicien qui correspond le mieux à une telle intervention. Il a des connaissances a priori sur le niveau de tous les techniciens.

Lors de l'utilisation d'un système de RA, l'utilisateur est amené à observer et interpréter les données fournies par plusieurs entités. Chacune de ces entités adopte un référentiel de présentation des données qu'elle fournit. L'utilisateur doit alors pour chaque entité comprendre le référentiel de présentation choisi, puis les données affichées. Il est donc opportun d'identifier cette caractéristique pour chaque relation afin d'aider le concepteur à choisir des référentiels de présentation cohérents pour chaque entité et réduire les efforts d'interprétation de l'utilisateur. Cette observation est également valable dans le sens inverse de l'interaction, c'est-à-dire lorsque l'utilisateur doit exprimer une donnée à destination d'une entité du système mixte.
La figure 3.8 montre la plate-forme du système ARIMA détaillant les différents paquetages.

III.3.4 Le système SVAM

Le système mobile SVAM (Système de Vision pour l'Aide à la Maintenance) doit permettre au technicien de réaliser l'opération de maintenance en se basant sur le principe de la RA.
L'entrée de ce système est un ensemble de données provenant de l'environnement réel et des interactions réalisées par l'utilisateur. La sortie consiste en un environnement réel augmenté par des informations virtuelles transmises directement au technicien par l'intermédiaire d'un serveur ou d'un expert.
Le système mobile peut être décomposé, dans notre cas, en plusieurs modules dont chacun est chargé de réaliser un ensemble de tâches.
Nous distinguons quatre (4) modules essentiels qui forment le système SVAM. Il s'agit des sous-ensembles suivants : le tracking, le contexte, l'interaction et la présentation (Figure 3.9).

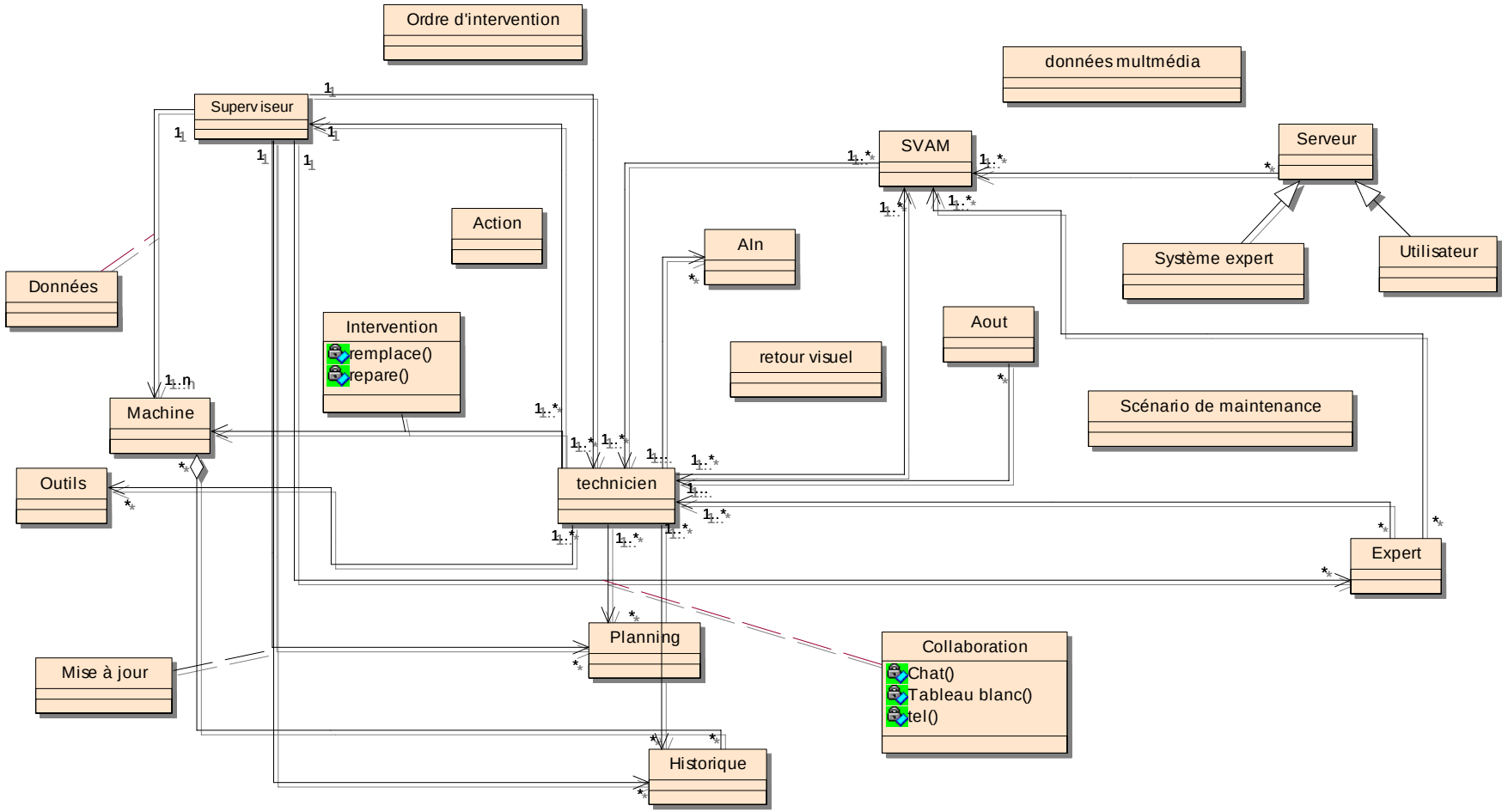


Figure 3. 8. Plate-forme ARIMA détaillant les différents paquetages et les relations entre eux

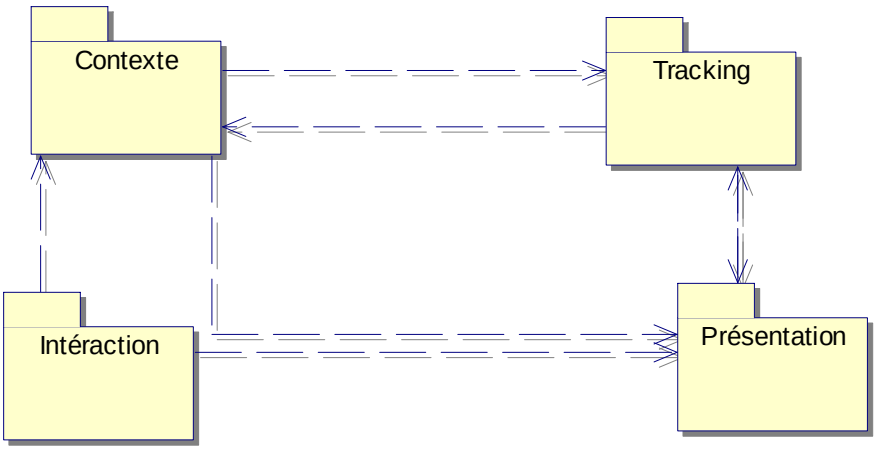


Figure 3. 9. Diagramme global du système SVAM mettant en évidence les différents paquetages et les relations entre eux.

Chaque paquetage peut être décomposé en sous-ensembles de la façon suivante (Figure 3.10).

- Le paquetage contexte est décomposé en : gestionnaire de contexte et préférence de l'utilisateur.
- Le paquetage tracking est décomposé en : système de recalage, camera et capteur de position.
- Le paquetage interaction est décomposé en : gestionnaire des interactions et entrée utilisateur.
- Le paquetage présentation est décomposé en : interface de sortie et contrôleur feedback.

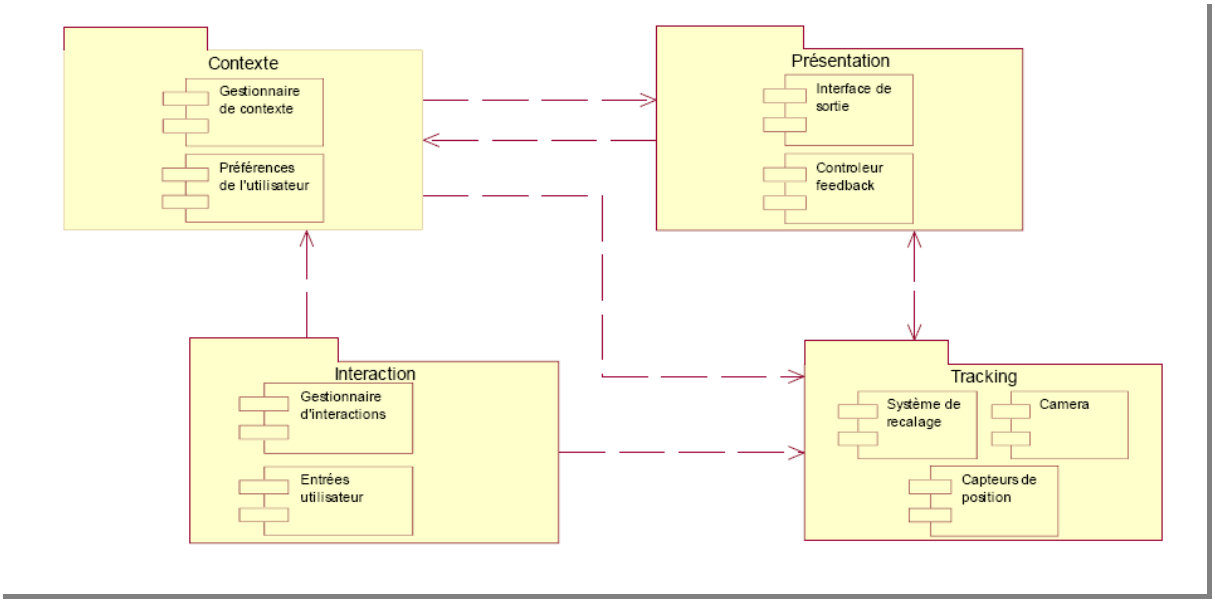


Figure 3. 10. Architecture détaillée du système SVAM sous forme de paquetages.

III.3.4.1 Détail des différents paquetages

Nous allons à présent détailler le contenu de chaque sous-ensemble afin de mieux comprendre le mouvement de données dans le système SVAM.

- ***Paquetage Tracking***

Le tracking est un élément principal dans un système de RA. Il est constitué de plusieurs éléments qui veillent à son bon fonctionnement. Il s'agit de caméras, de capteurs de position et d'orientation et d'un système de recalage. Dans la plupart des systèmes de RA on trouve une caméra qui sert à l'acquisition de l'image destinée à l'augmentation.
Les capteurs de position et d'orientation permettent l'alignement des objets virtuels insérés dans l'image réelle et ceci à chaque mouvement de l'utilisateur. Ces capteurs doivent garantir un suivi pertinent lors d'un déplacement.
Dans notre cas, les données issues de la caméra et des différents capteurs sont ensuite traitées par un système de recalage qui assure l'opération de tracking.

- ***Paquetage Interaction***

L'utilisateur peut interagir avec le monde virtuel en utilisant des gestes (avec la main), en déplaçant un stylo (ou marqueur) localisé, ou en choisissant des articles de menu à partir d'un tableau virtuel.
A chaque mouvement de l'utilisateur, le système de RA s'adapte et fait réagir certaines composantes du système.
Plusieurs prototypes d'interaction on été développés. Il s'agit par exemple, d'appuyer sur des boutons 2D qui apparaissent sur un écran à contact ou de déplacer des objets sur une palette.
Le module «Interaction» reçoit les informations, issues des événements de (s) l'utilisateur (s), à partir des dispositifs d'entrée (souris, clavier, pointeur, écouteur, …). Ces informations sont traitées par un gestionnaire d'interactions et ensuite envoyées vers les autres modules. De plus, le sous-ensemble « Interaction » utilise d'autres données issues principalement du tracking et du contexte de l'utilisateur.

- ***Paquetage Contexte***

En plus de la position et de l'orientation, d'autres informations contextuelles sont nécessaires pour réaliser une application de RA. Le contexte est défini comme toute information qui influe sur l'interaction entre l'utilisateur et le système. Le contexte est mesuré à partir d'un ensemble de capteurs matériels. Nous citons par exemple, les accéléromètres, les dispositifs RFID, les capteurs de température, les microphones, etc. En plus de ceux utilisés pour le tracking. Les informations issues de ces capteurs sont généralement utilisées pour prendre en compte certaines données concernant la situation de l'utilisateur. Outre que les capteurs, un gestionnaire de contexte est nécessaire pour traiter les données issues des différents capteurs et les transmettre aux autres modules.

Un exemple d'usage du module « Contexte » est illustré dans une action d'équipe. L'information contextuelle (telle que la température dans une application de lutte contre l'incendie) doit être rapidement distribuée entre les utilisateurs mobiles.

- ***Paquetage Présentation***

Afin d'enrichir le monde réel, le système de RA doit présenter l'information augmentée à l'utilisateur. A cet effet, la présentation doit intégrer ces augmentations d'une façon cohérente pour assister l'utilisateur dans son environnement d'action.
Plusieurs types de présentation peuvent exister. Nous citons par exemple les présentations de type textuel, graphique 2D/3D, etc.
En plus du matériel d'affichage tel que les moniteurs d'ordinateur, les Pc portables, etc. Les systèmes de RA utilisent également des casques HMD, des PDA et des écrans de projection. Pour la sortie audio, des écouteurs, des haut-parleurs, des systèmes audio spatiaux sont utilisés. D'autres types de médias sont en outre utilisés. Il s'agit, par exemple, du feedback haptique qui exige un matériel spécifique.

L'élément clé du module « Présentation » est le sous-ensemble « Interface de sortie » qui affiche la scène augmentée. L'interface de sortie contient trois types d'éléments. Le module « Gestion des augmentations » qui décide du choix de l'augmentation à insérer dans les images correspondantes. Les modules « rendu texte » et « rendu 3D » qui permettent le mixage des deux mondes : réel et virtuel.

Le module « Présentation » comporte aussi un contrôleur feedback qui permet le renvoi des données au module « tracking » afin de réaliser le principe de suivi.

En outre, le module « Présentation » dépend des informations issues du module « Contexte », car l'environnement dont lequel se trouve le système influe sur le type d'informations que doit recevoir l'utilisateur. La figure 3.11 ci-dessous présente le dispositif SVAM détaillant le contenu des différents paquetages.

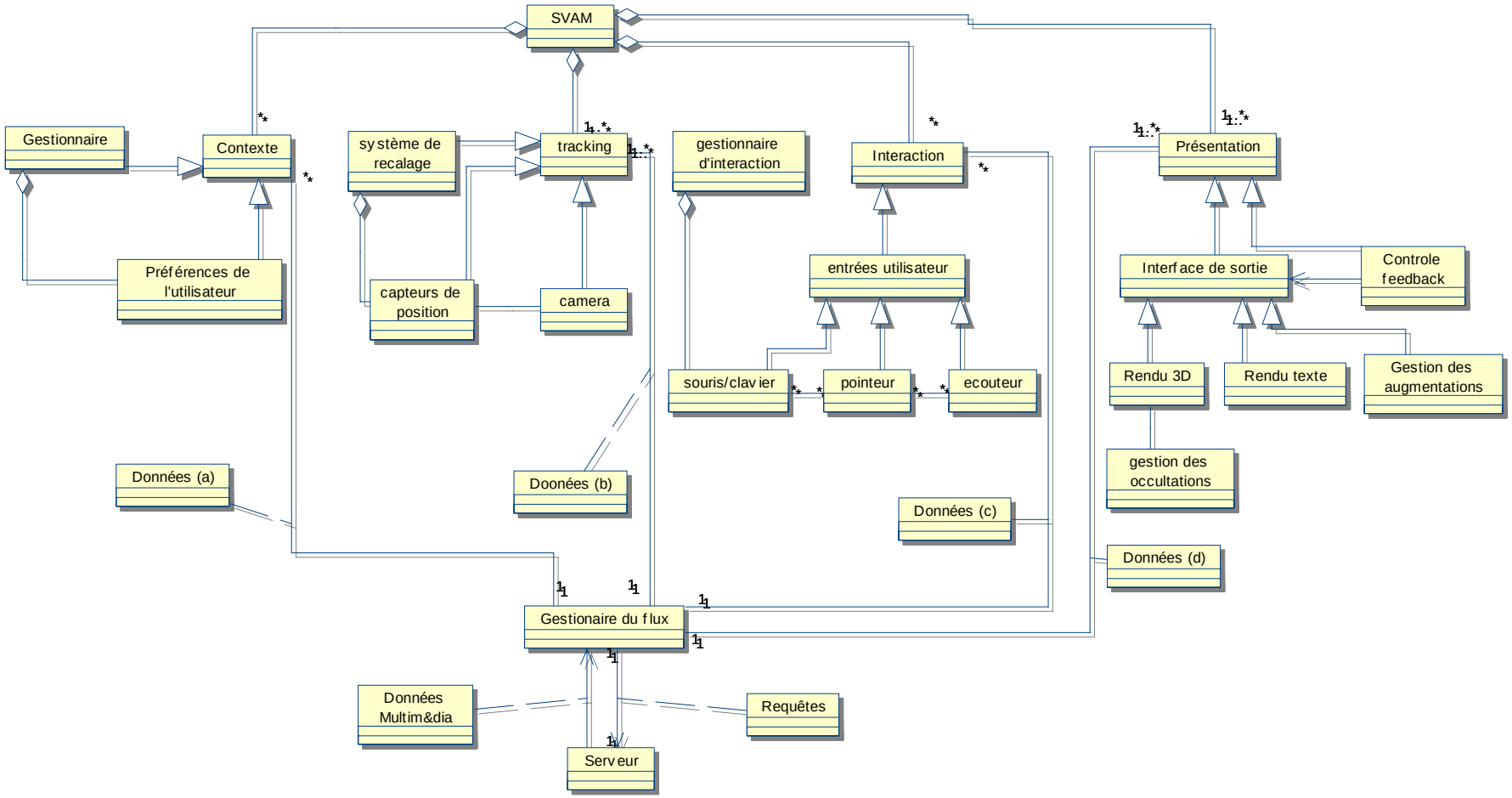


Figure 3. 11. Architecture détaillée du système SVAM sous forme de diagramme des classes

III.3.4 Caractéristiques des composants et des relations

Le technicien est amené à interagir avec les deux mondes réel et virtuel simultanément. Par conséquent, avant de passer à la réalisation du système, une validation ergonomique doit être faite au préalable. Pour que cette évaluation puisse avoir lieu, il est à notre charge de leur fournir des caractéristiques ergonomiques propres aux entités rattachées à l'utilisateur et aux relations qui les lient à ce dernier.

III.3.4.1 Caractéristiques des composants

Les entités reliées à l'utilisateur sont la *machine*, les adaptateurs d'*entrée* et de *sortie* A_{in} et A_{out} ainsi que les *outils*. Les valeurs des caractéristiques sont déterminées par rapport à l'utilisateur. Ces caractéristiques déterminent deux environnements : perceptif et actionnel [DNT02]

– **L'environnement de perception:** il est identifié par deux propriétés:

- Le sens perceptif: l'utilisateur perçoit les données du composant. Il existe cinq sens de perception: visuel, auditif, tactile, olfactif et gustatif.

- Le lieu de perception: c'est le lieu géographique où l'utilisateur perçoit les données.

– **L'environnement actionnel**: il est identifié par deux propriétés:

- Le type d'action: l'action servant à transmettre des données aux composants. Elle peut être physique ou langagière.

- Le lieu de perception ou d'action: c'est le lieu géographique où l'action se déroule.

Les environnements perceptifs et actionnels s'appliquent aux adaptateurs d'entrée et de sortie, ainsi qu'aux entités du monde réel utilisées comme outils ou objets de la tâche. En fonction du type d'action que l'utilisateur entreprend avec ces entités, le sens perceptif peut prendre plusieurs valeurs. En effet lors du déplacement d'un objet réel par exemple, des actions physiques sont effectuées et un retour tactile est perçu par l'utilisateur, ce qui induit une perception haptique.

III.3.4.2 Caractéristiques des relations

Une relation entre l'utilisateur et une des entités de son environnement interprète une communication entre ces deux derniers. Elle possède des caractéristiques qui sont:

– **Caractéristique d'un langage**: il possède les propriétés suivantes [Ber94] :

- Statique/dynamique: cette caractéristique traduit la présence ou non d'une dimension temporelle dans la forme des données véhiculées.

- Linguistique/non linguistique: cette caractéristique représente l'existence ou non d'un système structuré de symboles remplissant une fonction de communication.

- Analogique/non analogique: cette caractéristique exprime la notion de ressemblance avec la réalité. Elle représente le fait que le langage utilisé s'appuie ou non sur une métaphore du monde.

- Arbitraire/non arbitraire: cette caractéristique décrit l'absence ou la présence de lien entre le contenu et le contenant. Un langage non arbitraire repose sur une fonction de correspondance qui n'a pas été définie par le concepteur mais qui est conventionnelle et connue de l'utilisateur.

L'expression et la sémantique des données échangées reposent sur le langage. L'aptitude d'un utilisateur à maîtriser un langage constitue donc la principale caractéristique du langage. Cependant, cela est fortement dépendant de l'utilisateur, et par conséquent, la caractérisation d'un langage est périlleuse. Néanmoins, les quatre propriétés ci-dessus constituent un point de départ [Ber94]**.** Nous avons donc retenu ces quatre caractéristiques, auxquelles nous jugeons nécessaire d'ajouter la prise en compte de la dimension spatiale.

En effet, avec le développement des méthodes de spatialisation des sons et de la visualisation stéréoscopique, un langage peut être tridimensionnel. Schneiderman [Sch96], pour la visualisation d'information, prend en compte la dimension de la donnée manipulée. Toutefois, cet aspect de la dimension ne correspond pas à nos objectifs, dans la mesure où une donnée peut être intrinsèquement 3D, tout en étant présentée à l'utilisateur sous forme 2D par exemple. Dans notre approche une relation UML représente un transfert d'informations qui ne donne pas nécessairement lieu à une représentation graphique.

– **La dimension spatiale**: elle représente le nombre de dimensions de la présentation (graphique, textuelle, haptique, etc.) porteuse d'informations pertinentes pour la réalisation de la tâche. Par exemple, un texte servant de légende à une carte géographique est représenté graphiquement en 2D, ou en 3D si l'on ajoute des ombres aux lettres, mais seule une dimension est pertinente puisque ce texte doit être lu et que la lecture d'un texte se fait de manière linéaire.

– **Le poids de la relation**: introduit par Graham [GWC+00] comme étant l'attention portée sur les données par l'utilisateur au cours de la réalisation de la tâche, le poids d'une relation est exprimé suivant un axe continu. Dans le cas de la maintenance par exemple, il s'agit des données d'aide à la maintenance fournies par le système. Nous n'avons conservé que quatre valeurs pour exprimer le poids d'une relation: aucun, périphérique, faible et élevée. Le poids exprime donc la pertinence et l'importance des données portées par la relation pour la réalisation de la tâche. Pour pondérer une relation, des études ergonomiques semblables à celles menées par [RRT+96] permettent d'établir l'importance des données affichées en comptabilisant la fréquence de consultation de ces données par le technicien au cours de la réalisation de la tâche.

Définir le poids des relations permet d'identifier les relations les plus importantes pour l'utilisateur au cours de la réalisation de sa tâche. Le poids

des relations implique donc un ordre entre les différentes relations composant l'interaction.

III.4 Eléments de réalisation logicielle

Dans cette section, nous présentons la réalisation logicielle de notre système. Comme pour tout logiciel, la conception logicielle d'un système de RA doit s'appuyer sur un modèle d'architecture logiciel afin d'une part de favoriser sa maintenance et sa portabilité et d'autre part de mettre en œuvre les propriétés logicielles [Gra96].
Un modèle d'architecture logicielle est utilisé lors de la phase de conception logicielle dans le cycle de vie du logiciel pour concevoir l'architecture du système. Dans un processus de développement, comme le montre la Figure.3.3 représentant les étapes d'un cycle en V, l'architecture d'un système interactif est le résultat de l'étape de conception globale. Dans ce qui suit, nous expliquons le modèle hybride PAC-Am*odeus* adapté à notre système de RA.
Nous avons exploré dans le chapitre II les modèles d'architecture de référence dans les systèmes interactifs. Ainsi, nous avons vu les modèles à couches, les modèles multi-agents et les modèles hybrides. L'architecture PAC-Amodeus adapté aux systèmes de RA apporte plusieurs éléments de réponse à nos besoins et peut être étendue pour satisfaire l'ensemble de nos pré requis.

III.4.1 Adaptation du modèle PAC-Amodeus aux systèmes de réalité augmentée

Le modèle PAC-Amodeus s'accorde parfaitement avec la spécificité des systèmes utilisant le paradigme de la RA du fait qu'il possède deux piliers réel et informatique indépendants [ZZA06b] [ZZ07].
Le pilier de gauche, *pilier informatique,* est dédié au système informatique, c'est-à-dire à toutes les entités du monde virtuel générées par ordinateur. Le pilier de droite, *pilier réel,* porte l'interaction de l'utilisateur avec le système aux moyens des périphériques d'Entrée/Sortie du système qui ne sont pas limités uniquement à la souris et au clavier, mais incluent aussi tous les adaptateurs d'entrée (A_{in}) et de sortie (A_{out}) identifiées dans la plate-forme.
Comme un système de RA fait intervenir plusieurs entités du monde réel, le pilier réel du modèle PAC-Amodeus doit être composé de plusieurs branches. Chacune de ces branches est donc liée à une entité du monde réel utile à l'interaction et la base de chaque branche est constituée d'un adaptateur permettant d'établir un lien entre l'entité réelle considérée et le reste du système. Cette adaptation aux systèmes de RA est schématisée par la figure 3.12. L'adaptation du modèle PAC-Amodeus permet une indépendance entre les traitements liés aux différentes entités du monde réel intervenant dans l'interaction de l'utilisateur avec notre système. Cette adaptation apporte en particulier une indépendance entre les différentes boîtes à outils utilisées

pour permettre l'intégration des entités réelles dans le système. Un Composant Technique de Présentation unique assure l'indépendance entre la mise en oeuvre concrète des objets d'interaction Composants Interaction de Bas Niveau et le Contrôleur de Dialogue. Plusieurs Composants Techniques de Présentation garantissent en plus une indépendance horizontale entre les différentes boîtes à outils requises. Cette indépendance entre les CTP de chaque branche favorise la modifiabilité du code.

III.4.2 Flux d'information dans le modèle adapté

Dans cette section, nous expliquons comment les traitements liés à la fusion entre les mondes physique et numérique sont localisés au sein de notre architecture.

Lors de la réalisation d'une tâche de maintenance, le premier acteur qui apparaît est le Composant Technique de Présentation CTP. Les actions physiques sont tout d'abord captées par le CTP, puis par le contrôleur de dialogue CD et l'Adaptateur du noyau fonctionnel ANF. Les actions informatiques sont ensuite déclenchées par le Noyau Fonctionnel NF. Les résultats suivent alors le chemin inverse pour arriver à l'utilisateur en l'occurrence le technicien. Ceci permettra à l'utilisateur de percevoir un retour d'information. Ce flux d'information représente une approche classique au sein de l'arche.

Cependant, certaines tâches du NF, qui peuvent être invisibles pour l'utilisateur, peuvent déclancher d'une manière automatique le fonctionnement d'autres actions internes du NF.

Le CD n'est pas informé de ces actions. De plus dans le cas de plusieurs NF, ces actions automatiques peuvent faire intervenir l'ANF si des résultats doivent être répercutés dans d'autres NF.

De manière symétrique, certaines entités du monde réel peuvent avoir une influence sur d'autres entités réelles, sans pour autant requérir les fonctionnalités offertes par le CD. Considérer le modèle PAC-Amodeus dans le cadre des systèmes mixtes, nous amène donc à mettre en évidence l'existence possible d'actions automatiques dans le pilier réel de l'arche.

En résumé, une augmentation est définie dans le contrôleur de dialogue, à partir des données fournies par le noyau fonctionnel.

Afin d'illustrer cette approche, prenons le cas d'une procédure de maintenance dans le cadre du projet AMRA [Did05]. Cette opération s'effectue sur un transformateur électrique situé sous le plancher des wagons de passagers :

Le Noyau Fonctionnel NF contient toutes les informations du manuel de maintenance du wagon en particulier les différentes étapes à suivre pour résoudre un problème précis.

Prenons le cas où « retirer les deux écrous auto-bloquant » doit être perceptible par le technicien. L'adaptateur du Noyau Fonctionnel ANF encode les étapes à réaliser dans un format compréhensible par le Contrôleur de Dialogue CD tels que les mots clefs *Retire*r, *déconnecter*, …

L'information est dirigée par le CD vers le CTP correspondant à la tablet-PC dans laquelle seront affichées les informations. D'autres CTP auraient pu être sollicités comme par exemple celui associé à un casque de visualisation, ou le PDA.
Le CTP associé à la tablet-PC déduit la manière avec laquelle il doit la rendre perceptible à l'utilisateur. Il peut s'agir d'un affichage textuel ou d'un affichage graphique (images 2D et images 3D), aligné avec le monde réel.
Les informations fournies par le dispositif sont traduites par le CIBN du localisateur en coordonnées x,y,z (position) et α, β, γ (orientation) et les transmet à son propre CTP. Le CD n'a pas besoin d'être informé de ces valeurs et elles sont donc directement communiquées au CTP de la tablet-PC.
Le CTP du localisateur va donc communiquer au CTP de la Tablet-PC dans le cas du changement de l'une de ces données. Il s'agit donc d'une action informatique automatique liée à des actions dans le monde réel et dont la réalisation demeure dans le pilier réel de l'arche du modèle PAC-Amodeus.

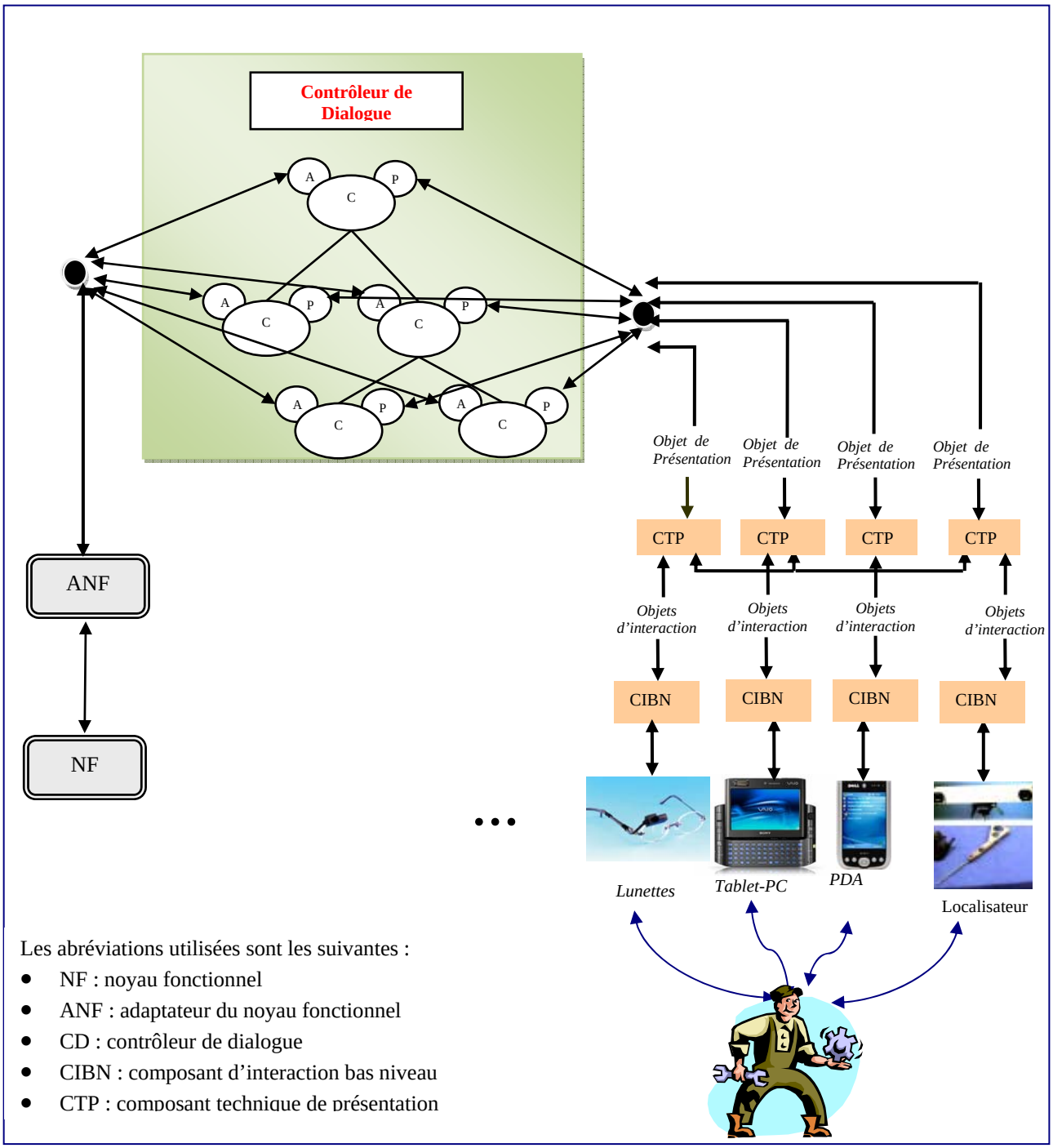


Figure 3. 12. Adaptation du modèle d'architecture PAC-Amodeus au système de réalité augmentée.

III.5 Application en e-maintenance

III.5.1 Architecture générale

L'application du modèle PAC-Amodeus en e-maintenance consiste en un partage d'informations entre l'opérateur et l'expert par le biais de requêtes client-serveur classique. A la figure 3.13, nous avons représenté un cas où la liaison réseau se fait au niveau de l'adaptateur du Noyau Fonctionnel.

L'Adaptateur du Noyau Fonction (ANF) est réparti entre le serveur et l'application. La connexion initiale se fait par un échange de message entre l'ANF "embarqué" et le processus de base de l'ANF sur le serveur dans le but d'instancier une communication propre au client.

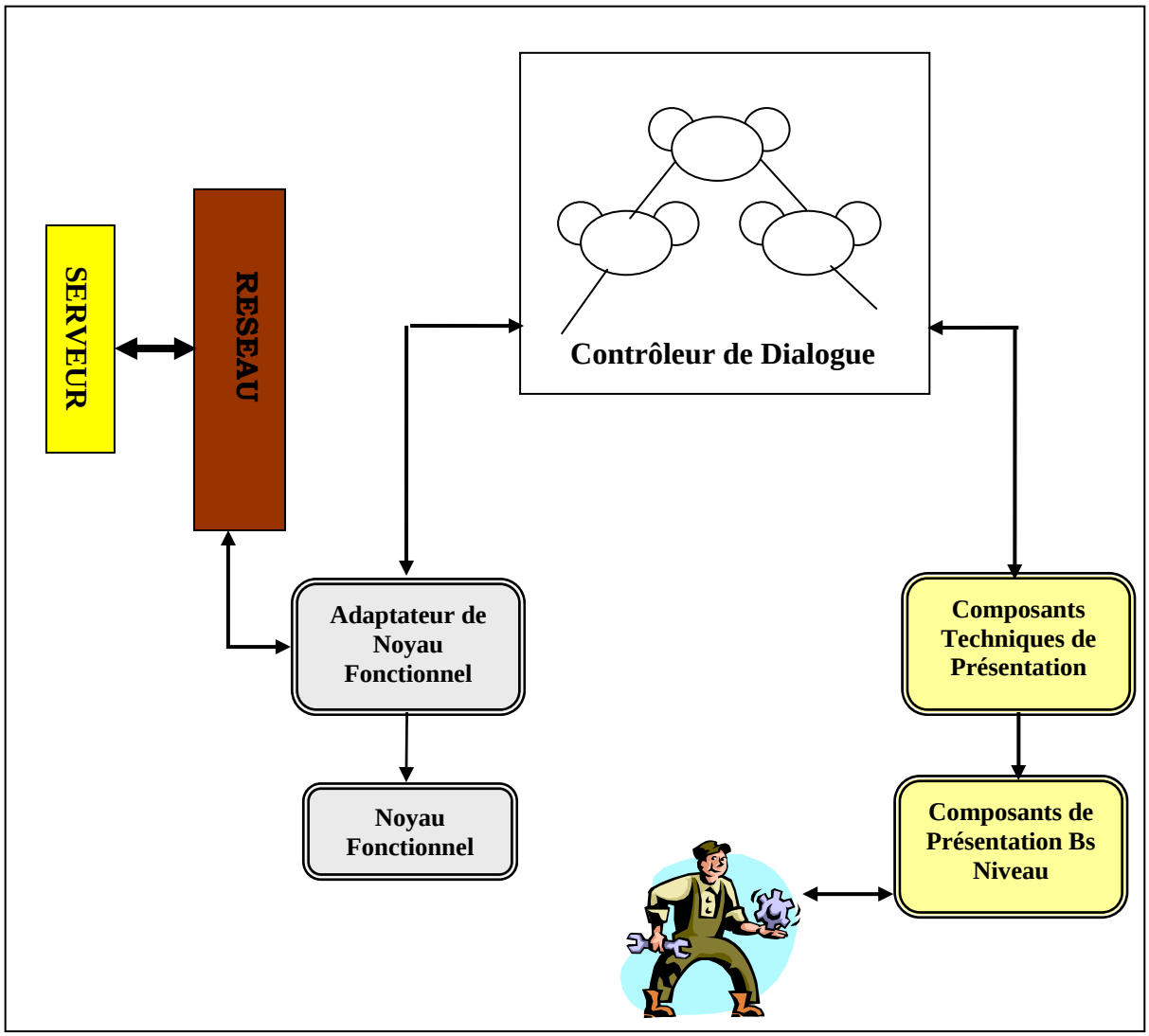


Figure 3. 13. Pac-Amodeus pour une application de e-maintenance (application client-serveur)

Nous avons retenu la solution Client-Serveur pour les raisons suivantes:

- Le client émet une requête vers le serveur grâce à son adresse IP et le numéro de port, qui désigne un service particulier du serveur,
- Le serveur reçoit alors la demande et répond à l'aide de l'adresse de la machine client et son numéro de port.

Le client dans notre projet représente l'opérateur de maintenance et/ou l'expert.

L'application client destinée aux techniciens est différente de l'application client destinée aux experts dans les points suivants :

- L'application destinée au technicien possède l'option *lancer une alarme* par contre l'application destinée à l'expert ne possède pas l'alarme mais plutôt reçoit des alarmes (rapports des pannes).

- L'expert a la possibilité uniquement de commencer la communication avec un technicien pour diagnostiquer la panne et proposer un scénario de maintenance.

III.5.2 Les modules de communication

La nouveauté dans notre projet réside dans le fait d'avoir réuni une multitude d'outils de communication dans un même système. Ces outils étaient souvent disponibles dans des systèmes différents et leurs intégrations sur un seul système est plus que nécessaire afin d'offrir plus de souplesse dans le travail coopératif.
Les outils intégrés par notre système sont :

- Le courrier électronique (utilisé pour envoyer les rapports de panne des réparateurs et les rapports de fin de session des experts),
- le dialogue en ligne,
- le transfert de fichier en temps réel.

III.5.2.1 Le courrier électronique

Nous utilisons le courrier électronique comme un outil d'échange des différents rapports entre les agents de maintenance.
La réalisation de cet outil de communication se fait par les Sockets préprogrammées en C++Builder6 qui fait partie de protocole TCP/IP.
Les Sockets sont divisées en deux branches : les sockets client et les sockets serveur:
Le Socket client permet d'effectuer une connexion TCP de façon relativement simple à un serveur (Socket serveur).
Le Socket serveur est semblable à la socket client mais s'applique au coté serveur.
La connexion est établie entre ces deux Sockets si l'adresse ou le nom d'hôte et le numéro du port sont identiques dans les deux Sockets .
Enfin, si la connexion est établie entre le client et le serveur, nous utilisons les méthodes SendBuf(Buffer, size) et ReceiveBuf(Buffer, size) pour transférer les différents rapports.

III.5.2.2 Le dialogue en ligne

L'option de dialogue en ligne n'est possible que si les participants au dialogue sont présents dans la même session. Avec les sockets de C++Builder6, nous utilisons les procédures SendText (chaîne de caractère) et ReceiveText (chaîne de caractère) pour échanger les informations entre les clients de chaque session.
Le serveur joue un rôle très important dans cette communication par l'attribution des adresses de dialogue de chaque session pour éviter les conflits de communication à partir les adresses des clients (experts ou techniciens) déjà connectés qui se trouvent dans la liste des utilisateurs (users) au niveau de serveur (figure 3.14).

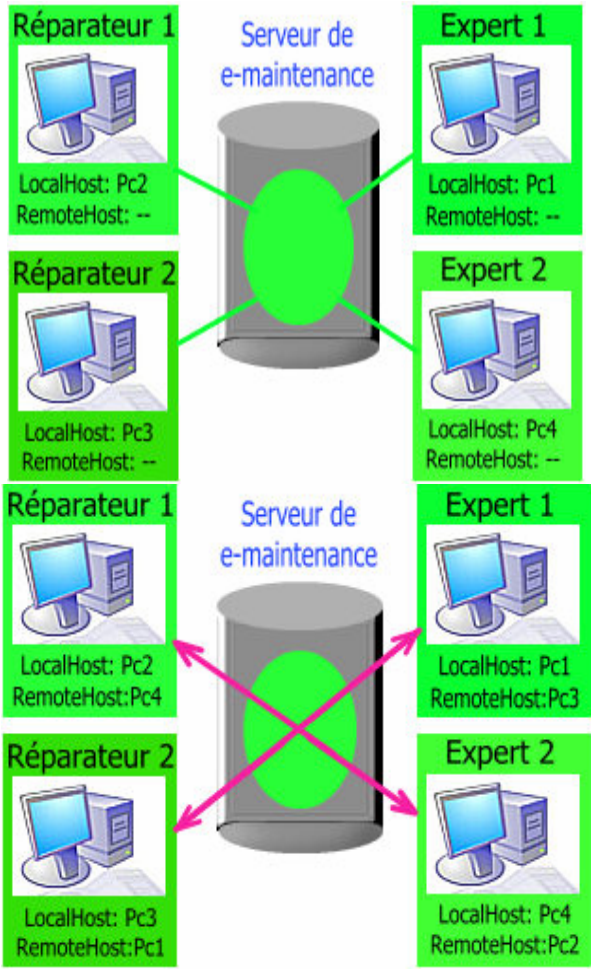


Figure 3. 14. La communication entre les différents sites

III.5.2.3 Le transfert de fichier en temps réel

Dans ce module, l'opération est exécutée en deux étapes : l'expéditeur *(Sender)* envoie le fichier vers le serveur puis le stocke dans sa base de données et l'envoie au destinataire (*Target*).
Le *Sender* exécute la méthode : *PostIt (file, size)* de la socket *NMStrm* de C++Builder6. Quand le serveur reçoit cette commande, il vérifie si le Target possède une connexion active, ensuite il utilise la méthode *OnMSG (file, size)* de la socket *NMStrmServ* pour lire les données, reconstitue le fichier, attribue un code unique et le sauvegarde dans la base de données.
Le serveur envoie directement ce fichier au destinataire (*Target*) par la méthode *PostIt(file,size)* et, en fin de transmission, le serveur envoie à l'expéditeur (Sender) le message « *Le fichier est envoyé avec succès* ».

III.5.3 Diagramme conceptuel d'un système de e-maintenace

III.5.3.1 Schéma logique de la base de données

La base de données a été réalisée sous Oracle 9i. C'est une base de données locale au niveau du serveur. Seule l'application serveur peut

accéder à cette base. La figure 3.15 montre le modèle « entité/association » de la base de donnée.

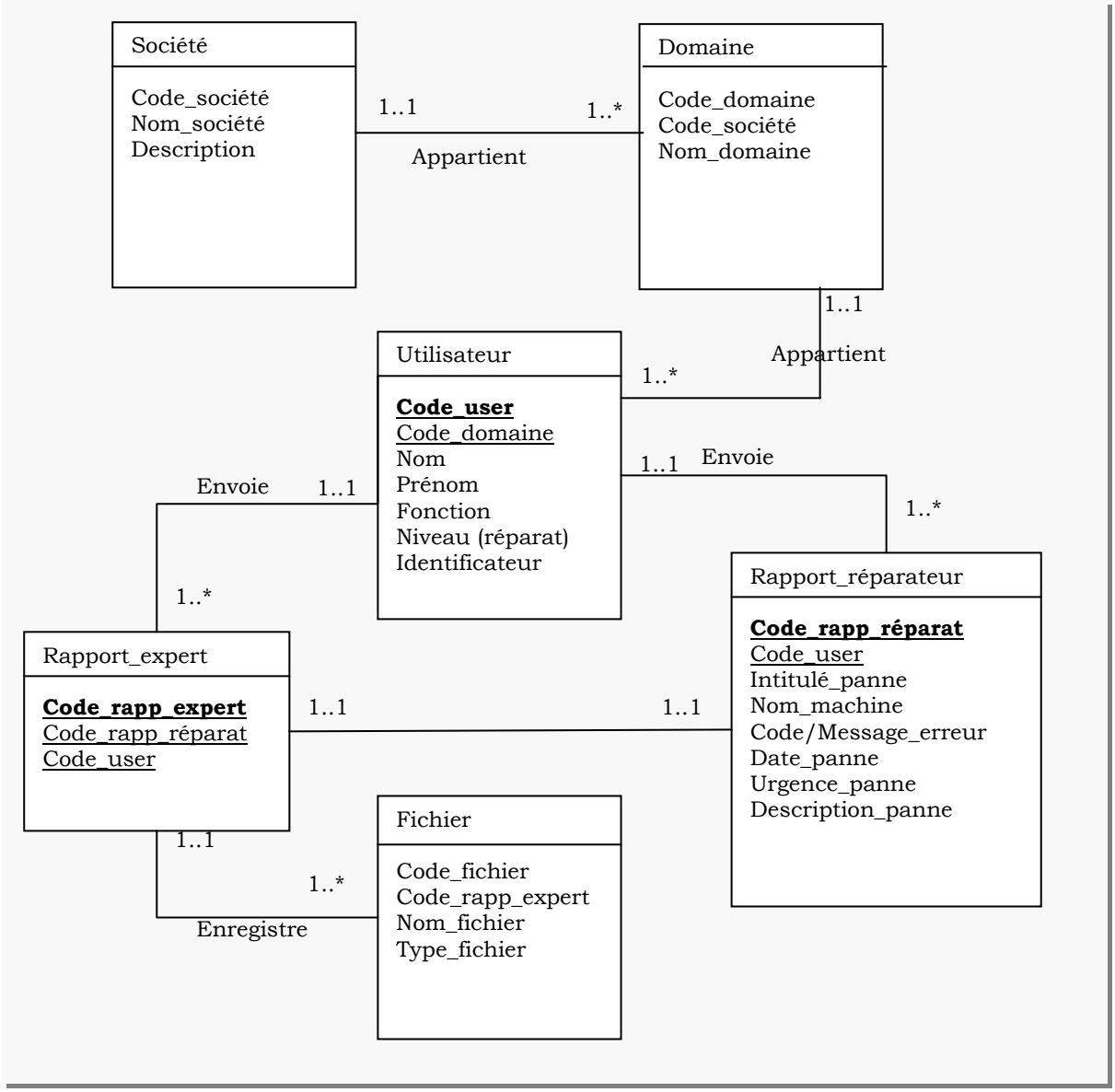


Figure 3. 15. Schéma de la base de données.

- La table *Société* contient les différentes sociétés qu'utilise notre système de e-maintenance. La mise à jour de cette table est faite par le superviseur
- La table *Domaine* contient les domaines de compétences de la société associée. (Mécanique, électronique, …). Le superviseur du système peut à tout moment faire la mise à jour de cette table (Ajout, supprimer, Modifier).
- La table *Utilisateur* contient toutes les personnes inscrites dans le système. L'inscription se fait par l'identification de chaque utilisateur par un mot de passe qui doit être unique.

- La table *Rapport_réparateur* contient tous les rapports qui sont envoyés par les réparateurs. Chaque rapport est caractérisé par l'intitulé de panne, le code du réparateur qui lance l'alarme, la date de panne, l'urgence de panne, la description de panne, le code (message) d'erreur et le nom de machine en panne.
- La table *Rapport_expert* contient les experts qui peuvent intervenir pour résoudre les pannes.
- La table *Fichier* contient tous les fichiers et documents pouvant être stockés dans la base de données tel que les fichiers échangés entre les différents intervenants du système.

III.6.5 Conception de l'application

III.6.5.1 Acteurs et cas d'utilisation

6.5.1.1 Acteur

Un acteur représente l'abstraction d'un rôle joué par les entités externes qui interagissent directement avec le système.
Les acteurs existants dans notre système sont :

- **L'administrateur (superviseur) :** gère le système de e-maintenance.
- **L'utilisateur :** c'est un agent de maintenance qui peut être un expert ou un technicien. Ces agents utilisent notre système pour faciliter les tâches entre eux.

6.5.1.2 Cas d'utilisation

Les cas d'utilisation permettent de décrire le comportement du système de point de vue de l'utilisateur.
Puisque notre système contient 2 acteurs (administrateur et utilisateur), nous avons alors:

Les diagrammes de cas d'utilisation pour l'utilisateur

L'acteur le plus important pour un outil de communication est l'utilisateur (expert ou réparateur). Les cas d'utilisation principaux sont : (figure 3.16)

- S'inscrire dans le service si c'est un nouvel utilisateur.
- Se connecter au service.
- Lancer une alarme pour le dépannage (seulement le réparateur).
- Assurer la communication entre l'expert et le réparateur.
- Quitter la communication.
- Se déconnecter.

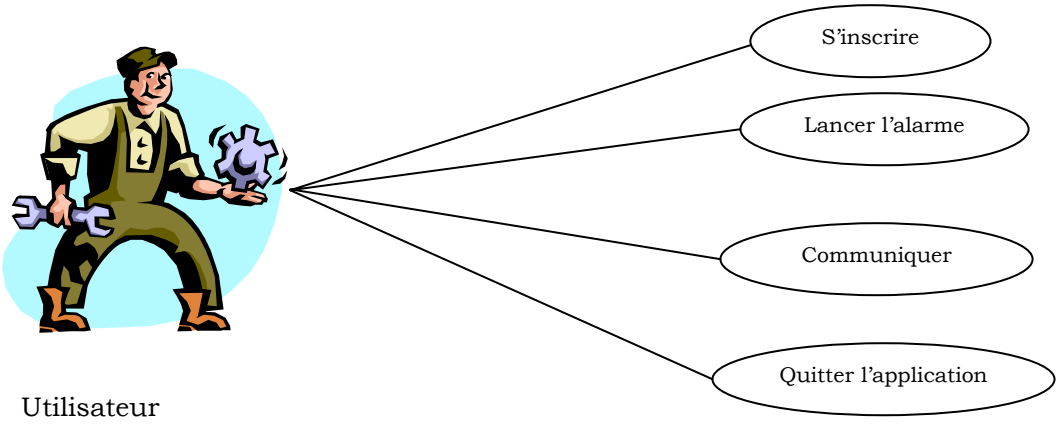


Figure 3. 16. Diagramme de cas d'utilisation de l'utilisateur.

Les diagrammes de cas d'utilisation pour le superviseur

Les cas d'utilisation de l'administrateur du système sont : (figure. 3.17)

- Démarrer le serveur (système),
- Arrêter le serveur (système).

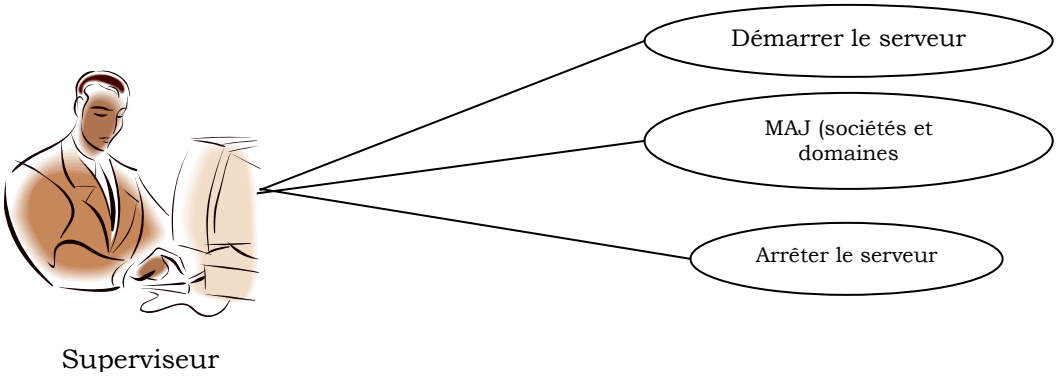


Figure 3. 17. Diagramme de cas d'utilisation de l'administrateur.

Diagrammes de séquences et/ou de collaboration :

Les diagrammes de séquences permettent de représenter le séquencement des interactions entre plusieurs objets impliqués une transaction particulière du système.
Les diagrammes de collaboration fournissent une représentation synthétique des interactions entre objets.

- **Inscription au système**

Pour pouvoir utiliser le système de e-maintenance par l'utilisateur (expert ou réparateur), il faut s'inscrire au système, introduire un nouveau mot de

passe et remplir les autres informations tel que (nom, prénom, société, domaine, fonction, niveau (pour le réparateur uniquement) et l'identificateur). A l'inscription, le système vérifie si ces informations sont fiables et que le mot de passe n'est pas utilisé par un autre client (expert ou réparateur). Il envoie alors la réponse de l'inscription au client (Echec ou succès) (figure 3.18).

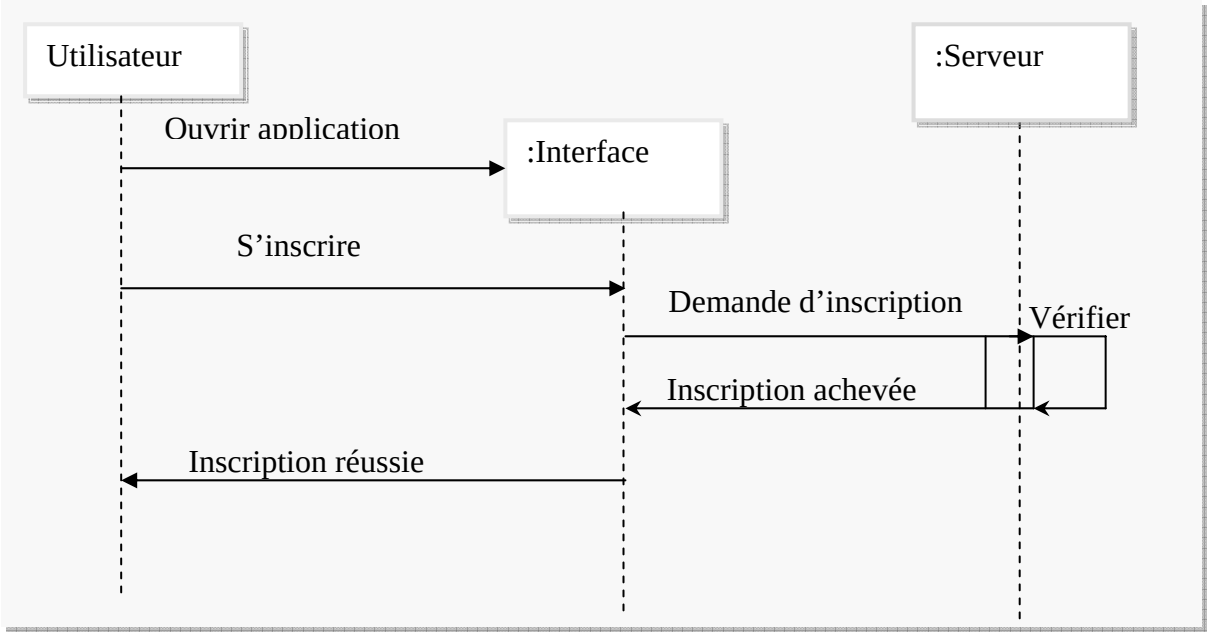


Figure 3. 18. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « inscription au service »

- **Accéder au système**

Pour que l'utilisateur (expert ou réparateur) puisse accéder à l'application client, il lui suffit d'introduire son mot de passe et son identificateur. S'il existe dans la base de données, l'application accède directement à l'interface utilisateur tel que:
« L'interface expert » si leur fonction est expert.
« L'interface réparateur » si leur fonction est réparateur (figure 3.19).

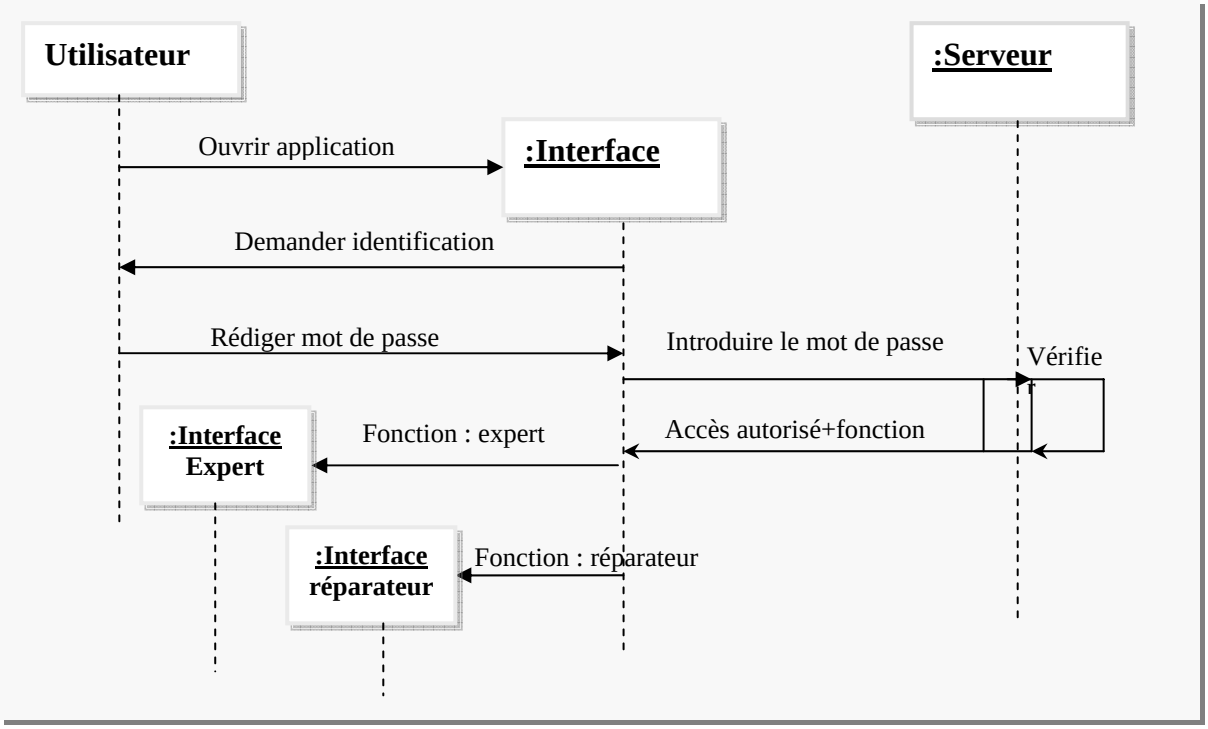


Figure 3. 19. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « accéder au système »

- **Lancer l'alarme par le réparateur**

A partir de « l'interface réparateur », l'utilisateur peut lancer une alarme au système à chaque moment. Pour lancer cette alarme, il suffit de remplir un rapport de panne qui contient toutes les informations de la panne survenue. Le système vérifie ce rapport.
Cette vérification introduit 2 cas :

- Si le rapport existe dans la base de données alors deux cas sont observés:
  - Rapport non traité : si un expert traite ce rapport le système envoie directement la réponse (solution) à tous les réparateurs qui lancent ce rapport.
  - Rapport Traité : dans ce cas , le système donne directement la solution.
- Si le rapport n'existe pas, le système enregistre ce rapport dans la base de données et lance cette alarme. (figure 3.20)

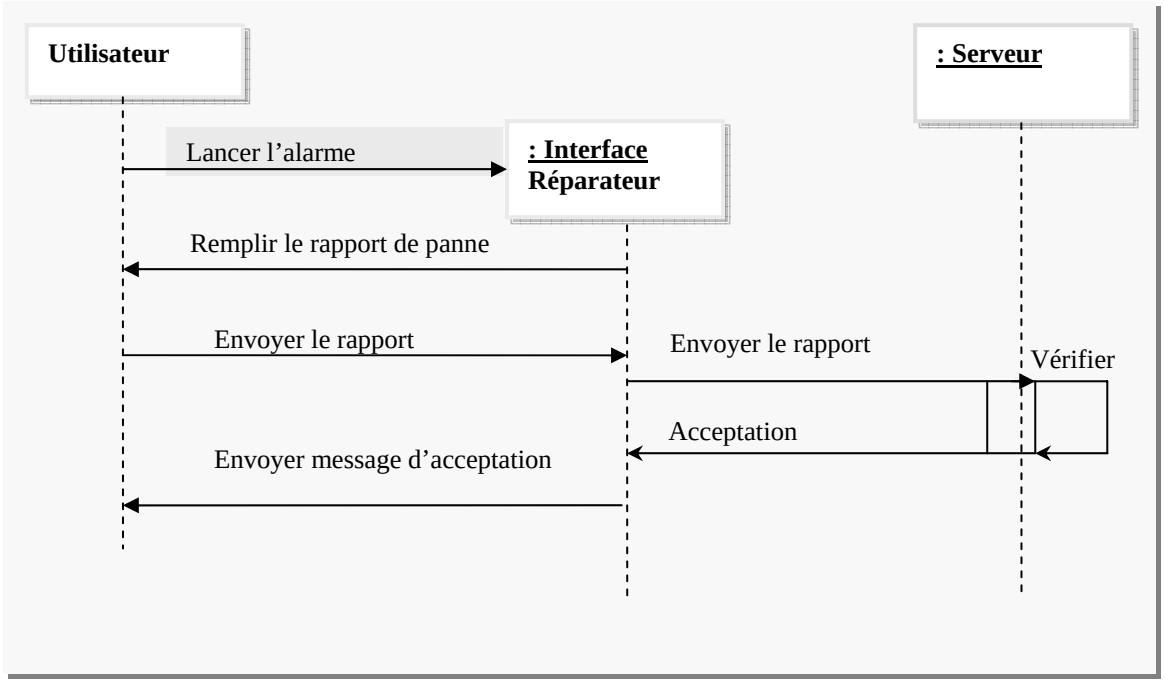


Figure 3. 20. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « Lancer l'alarme »

- **Envoi des rapports des pannes aux experts**

Le système envoie automatiquement à l'expert tous les rapports des pannes qui ne sont pas traités. L'expert peut choisir, consulter et traiter les rapports reçus (figure 3.21).

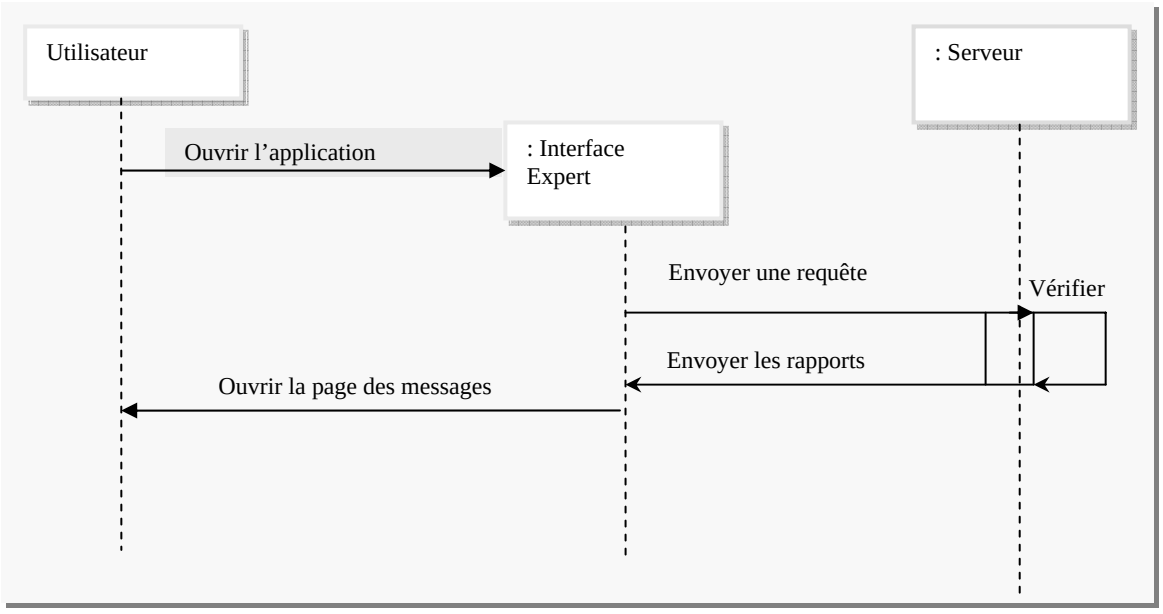


Figure 3. 21. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « Envoi les rapports aux expert»

- **Etablir une communication entre l'expert et le réparateur**

L'expert choisit l'un des rapports reçus et demande au serveur d'établir la communication avec le réparateur concerné par ce rapport.

Si le réparateur est disponible, la communication est établie entre eux, sinon le serveur envoie un message d'échec de communication à l'expert. (figure 3.22).

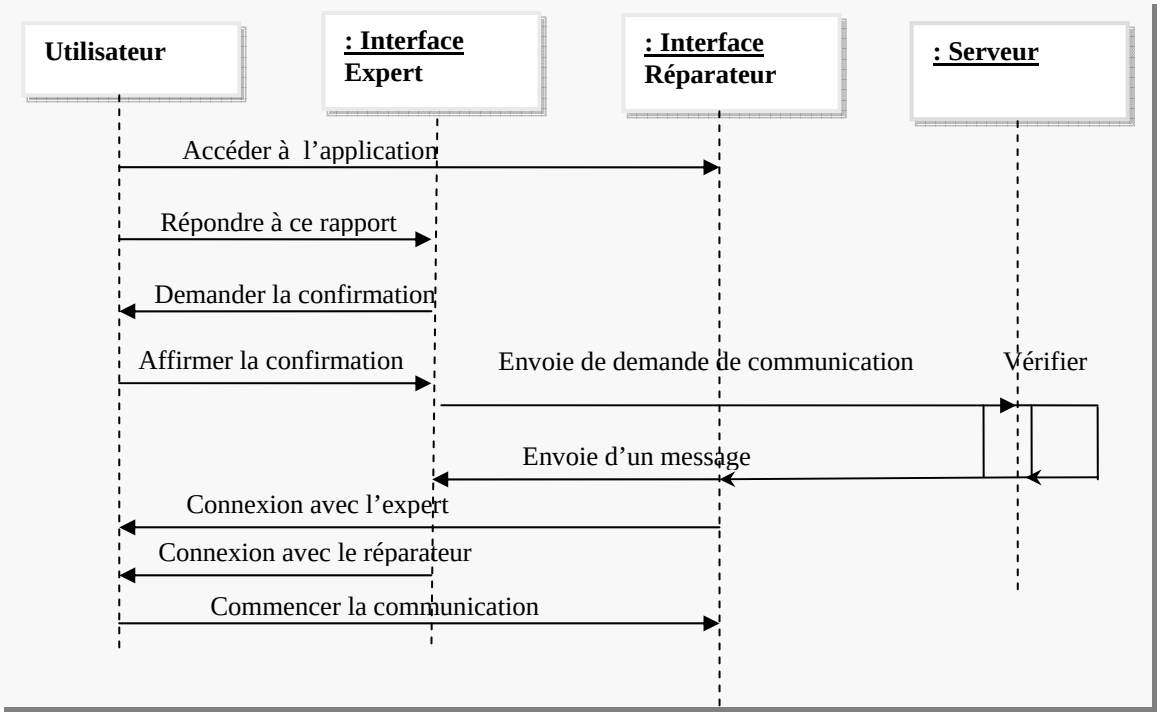


Figure 3. 22. Diagramme de séquences du cas d'utilisation « communication entre l'expert et le réparateur»

- **Terminer la session**

La session peut se terminer à tout moment par l'un des deux clients (Expert ou réparateur) qui appartiennent à cette session. Nous distinguons deux cas (figure 3.23) :

- Si le problème est résolu, l'expert doit remplir le rapport de fin de session et l'envoie vers le serveur pour le stocker afin qu'il puisse être réutilisé par un autre réparateur.
- Si le problème n'est pas résolu, le rapport de panne reste dans un état non traité (reste dans la liste des rapports qui ne sont pas traités au niveau du serveur).

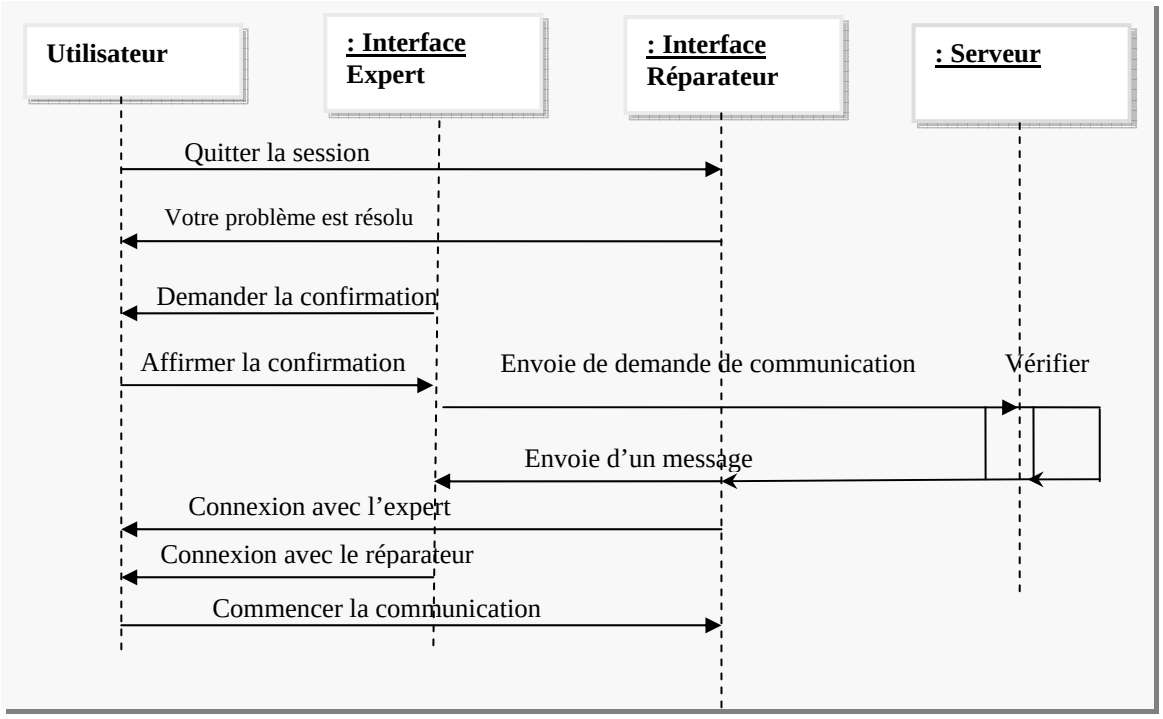


Figure 3. 23. Diagramme de séquences du cas d'utilisation «Terminer la session».

III.7 Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre une démarche pour la conception et la réalisation d'un système de RA centré sur l'analyse de l'interaction entre l'utilisateur, le système et le monde réel.

Notre démarche de conception du système a suivi les étapes édictées par le modèle en V issu du génie logiciel. Après avoir exposé les propriétés ergonomiques spécifiques aux systèmes de RA, nous avons présenté la conception logicielle de notre système en proposant un modèle d'architecture logicielle, une adaptation du modèle PAC-Amodeus à notre système de RA. Nous avons montré que ce modèle s'accordait parfaitement avec notre système de RA car il comprenait deux piliers réel et informatique indépendants.

D'après la définition des composants du modèle PAC-Amodeus, le Composant Technique d'Interaction CTP assure l'indépendance entres les objets d'interaction composant le pilier réel du modèle PAC-Amodeus. Cette indépendance entre les Composant Technique d'Interaction des branches associées aux différents adaptateurs favorise donc la modifiabilité des codes.

Le modèle PAC-Amodeus adapté à notre système est donc un modèle d'architecture qui permet de favoriser fortement la modifiablité du code pour les langages associés aux relations UML.

Nous pouvons conclure qu'un lien est bien établi entre UML et notre modèle d'architecture PAC-Amodeus. En effet, les adaptateurs d'entrée et de sortie du modèle UML sont présents au niveau du Composant d'Interaction Bas

Niveau CIBN du modèle d'architecture. De plus les langages utilisés pour les relations UML interviennent au niveau du Composant Technique d'Interaction du modèle d'architecture.
En clair, le modèle PAC-Amodeus adapté à notre système de RA est donc un modèle qui permet de favoriser une forte modification du code pour les langages associés aux relations UML.
Le chapitre suivant montre l'application de nos résultats de conception ergonomique et logicielle pour la mise en œuvre de notre système pour l'aide à la maintenance *ARIMA*. La réalisation logicielle de notre système illustre l'application de notre réalisation logicielle, en particulier la mise en oeuvre de notre modèle PAC-Amodeus adapté.

L'homme ne se nourrit pas de vérité, l'homme se nourrit de réponses !
(Monsieur Malaussène)
*___Pennac, Dani*el

Chapitre IV

Des résultats conceptuels à la réalisation : application au système ARIMA

Introduction

Au chapitre II, nous avons défini les modèles d'Interaction Homme-Machine ainsi que les modèles d'architectures logicielles. Nous en avons extrait le modèle d'architecture adapté à notre système de RA. Dans le chapitre précédent, nous avons décrit les éléments de conception logicielle. Nous avons proposé une architecture globale générique dans le but d'expérimenter les systèmes de RA. L'objectif de ce chapitre est d'appliquer ces résultats à la réalisation de notre système de RA pour l'aide à la maintenance.
Ce chapitre est consacrée à une application en emaintenance : *ARIMA*. Nous décrivons dans un premier temps le projet *ARIMA* et ses objectifs tels qu'ils étaient posés initialement et la démarche adoptée. Notre présentons le premier choix architectural concernant le type de matériel et de périphériques utilisés dans notre plate-forme. Nous abordons ensuite réalisation logicielle en terme d'agents PAC au sein du contrôleur de dialogue de notre modèle PAC-Amodeus étendu à notre système. Nous analysons également quelques procédure de maintenance utilisées dans le cadre de notre projet. Nous concluons ce chapitre par les résultats de l'évaluation expérimentale de *ARIMA*.

IV.1 Description du projet ARIMA

Le système *ARIMA* est un acronyme pour les mots en anglais *Augmented Reality and Image processing in e-Maintenance Application.* Il s'agit d'un système qui cherche à étudier comment le concept de la RA peut aider les techniciens à accroître leur efficacité dans des *activités de e-maintenance.*
L'idée est donc de mettre en place un environnement de travail pour l'aide à la maintenance permettant à des techniciens de manipuler des documents électroniques avec des outils réels.
La figure 4.1 montre une structure générale du système *ARIMA*.
1. L'intervenant se connecte à l'application et accède à son planning. Une fois sur le lieu de l'intervention, il récupère toutes les caractéristiques de la machine concernée à savoir l'historique des interventions, les derniers intervenants,…
2. À partir informations acquises sur la machine, le technicien lance la procédure de maintenance maintenance correspondant à la machine sur laquelle il veut intervenir. Le scénario de maintenance est transmis sous forme d'augmentations au niveau des dispositifs de RA portés par le technicien.
3. Une fois l'intervention effectuée, le technicien envoie la confirmation au superviseur et remplit un rapport de maintenance indiquant la nature de la panne et le type d'intervention. Le superviseur, à son tour, met à jour le planning d'intervention en intégrant le nouveau rapport de maintenance.
4. En cas de rupture de compétence, le technicien collabore à distance avec un expert. Ce dernier accède au contexte, à l'historique de l'intervention et guide le technicien dans ses tâches de maintenance via des indications graphiques, textuelles ou orales.
5. La procédure se termine par la mémorisation d'un historique de maintenance.

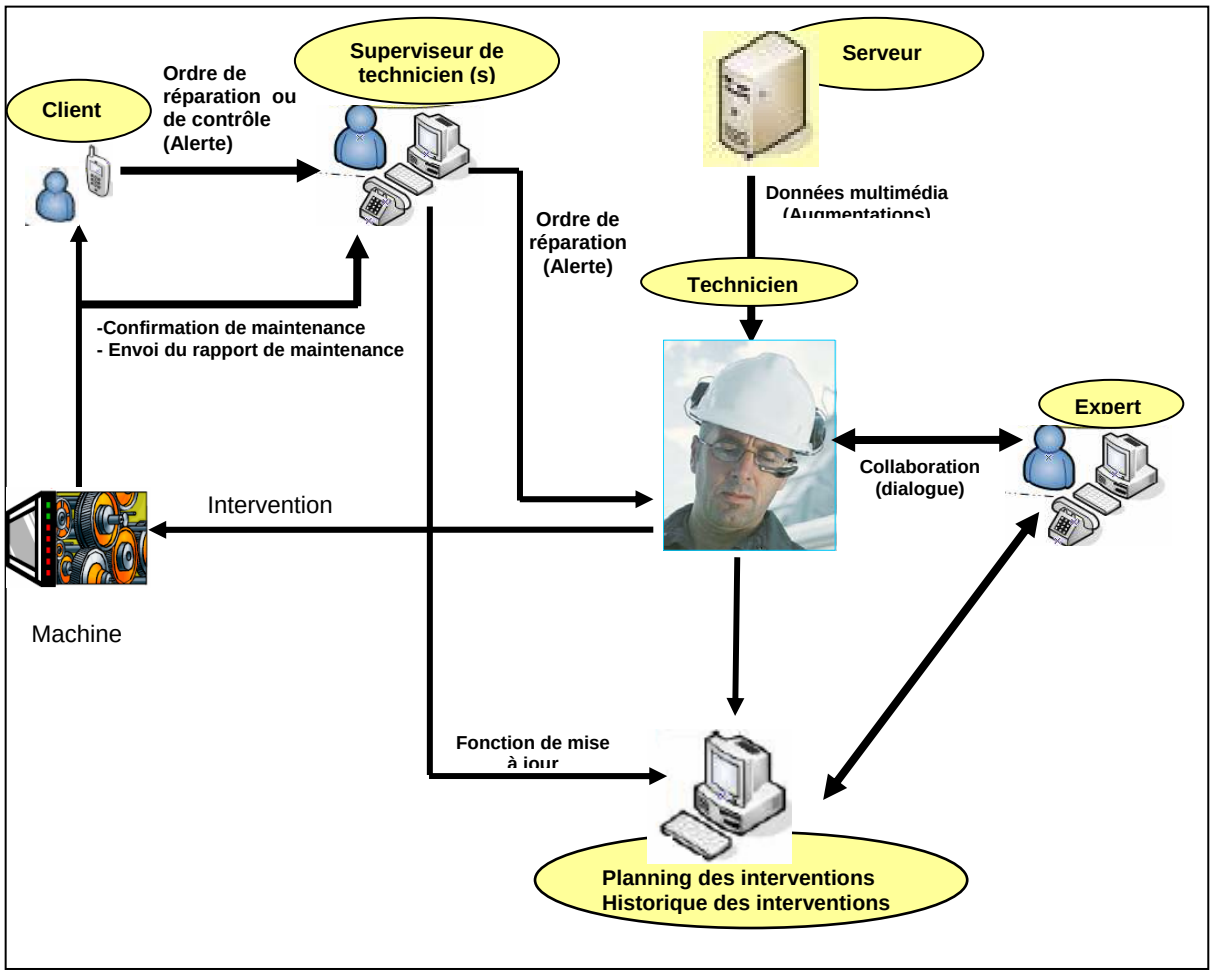


Figure 4. 1. Architecture globale de la Plate-forme ARIMA

IV.2 Liens et apport de la réalité augmentée dans un processus de maintenance

La RA est un ensemble de technologies qui induisent de nouvelles formes d'Interaction Homme Machine. L'idée d'augmentation introduit la notion de l'enrichissement de l'information véhiculée par les objets virtuels [ABM+05]. Ces informations sont accessibles par l'utilisateur et directement recalées dans l'environnement immédiat du monde réel. A l'heure actuelle, les dispositifs de RA font l'objet de recherches technologiques et il existe très peu de méthodes d'évaluation adaptées aux technologies émergentes [BGH02].

IV.2.1 Evaluation ergonomique des systèmes de RA

Afin d'évaluer la qualité des prototypes de RA, Wiedenmaier [WOS+03] propose une méthode basée sur les tests utilisateurs. Ces tests sont en général réalisés en laboratoire et ce, d'une manière analytique. Cette méthode consiste, en utilisant des petits échantillons, à comparer différents

dispositifs d'interaction et ce, afin de déterminer le plus pertinent pour une tâche donnée.
D'autres auteurs ont également recours à des évaluations expertes bien que l'utilisation de cette méthode soit beaucoup moins documentée dans la littérature sur l'ergonomie de la RA [Hix04). Actuellement, l'évaluation experte est réalisée sur des maquettes d'écrans, généralement très en amont de la conception des dispositifs. Le principal avantage de l'utilisation de cette méthode dans le cadre d'un projet serait le bon rapport coût/résultats utilisables par la conception.

IV.2.2 Principales conclusions sur l'utilité et l'utilisabilité de la réalité augmentée dans la maintenance

Les principales conclusions quant à l'utilisabililté des dispositifs de RA sont les suivantes :

- La commande vocale en entrée n'est pas très adaptée dans des environnements bruyants. Ceci provoque une imprécision dans la vitesse de réalisation d'une tâche donnée [Bab01].
- Les interfaces tactiles, également en entrée, sont difficilement associables à une activité manuelle [Bab01]. [BKH+99]. Une solution temporaire à ces problèmes, avant la formalisation éventuelle de critères de conception, pourrait être une utilisation limitée à un contexte spécifique, ce qui demanderait une analyse fine de la tâche à réaliser.
- Les casques de visualisation comme dispositifs en sortie, posent de nombreux problèmes de charge physique et induisent une certaine surcharge mentale [ZAK05]. Les auteurs préconisent un port d'une durée relativement courte et une distribution équitable du poids des dispositifs entre les différentes parties du corps en fonction de l'activité de l'opérateur.
- Une étude de terrain révèle que des opérateurs de maintenance sont très réfractaires au port de casques de RA [DRM+05]. D'autres recherches montrent que les systèmes de RA basés sur les casques de visualisation n'améliorent pas, voire même détériorent les performances des sujets par rapport à un système utilisant un écran classique ou un tablet PC lorsqu'il s'agit de tâches simples de maintenance [SS01].
- Baber, Haniff, et Cooper ont décrit les questions ergonomiques liées aux dispositifs d'entrée et de sortie et ont fournis quelques directives pour leur usage : Des dispositifs plus lourds doivent être en général disposés autour de la taille des utilisateurs [BKH+99].
- Quant au suivi de procédures, les opérateurs de maintenance réalisent plus rapidement des tâches de montage/démontage et avec moins d'erreurs lorsqu'ils utilisent un système de RA comparativement à un guidage par des manuels papiers qui peuvent être souvent trop encombrants pour l'accomplissement d'une tâche donnée [WOS+03].

- L'utilisation d'un système de RA pourrait être avantageux pour des tâches demandant une application stricte de procédures [Bab01]. En revanche, ce phénomène peut être une contrainte dans des contextes de travail hautement dynamiques.
- Un autre domaine d'application des technologies de RA est la formation rapide sur le tas. Les résultats empiriques actuels, bien que peu concluants, montrent qu'un système de RA s'avèrerait aussi efficace qu'un écran classique quant il s'agit de comprendre, stocker dans la mémoire à court terme et se rappeler des messages textuels courts et des icônes [SS01]. Quant aux résultats expérimentaux relatifs à l'efficacité de l'apprentissage en RA et la qualité du transfert dans la situation de référence, ils restent peu nombreux et fortement contradictoires [SH02].
- Certaines activités demandent à l'opérateur l'usage de ces deux mains et un effort de concentration considérable. Le fait d'être obligé de détourner la tête vers un manuel (ou autre) implique une perte de temps, un effort de transposition et une perte de concentration lors de la tâche. La RA propose une solution en superposant les informations pertinentes sur l'environnement réel via les dispositifs d'affichages (casques, PDA ou des tablet-PC) [SH02].
- L'opérateur peut avoir des accidents de travail dus à une mauvaise manipulation, comme l'accès à des régions électrifiées sans débrancher la machine. La RA permet une assistance ardue tout au long de l'intervention. Une sécurité plus développée est à portée du maintenancier [WOS+03].
- Dans l'environnement de travail habituel du maintenancier, la quantité d'information disponible est sous forme de lots et par conséquent difficile gérer et à exploiter. La RA apporte à juste titre des informations nécessaires, là où il faut et quand il faut, d'une manière ciblée. Ainsi un gain de temps est obtenu.[WOS+03].

IV.3 Plate-forme matérielle

IV.3.1 Matériels utilisés

Le premier choix architectural concerne le type de matériel et de périphériques utilisés pour notre application de RA. Au départ, nous nous étions orientés vers des casques semi-transparents en vue d'augmenter la vue de l'utilisateur. Cependant, nous nous sommes confrontés à des situations qui nous ont poussé à faire le choix suivant pour plusieurs raisons :

- Les casques de visualisation de type HMD sont de deux types : ceux à faible coût avec un champ de vision très restreint (moins de 30° en diagonale dans la plupart des cas) et ceux à fort coût, envisagés pour

notre type d'application et qui sont malheureusement dans la plupart des cas très encombrants.

- Les casques de visualisation posent de nombreux problèmes de charge physique et induisent une certaine surcharge mentale.
- Certaines positions comme l'accès à des endroits étroits et difficiles d'accès ne permettent parfois pas aux techniciens d'utiliser et de porter confortablement les lunettes semi-transparentes et les accessoires qui lui sont associés (batterie, unité de calcul portable, etc.).
- Finalement, une étude nous a révélé que les agents de maintenance étaient réfractaires au port de casques semi-transparentes (Figure 4.2). Leur utilisation n'améliorent pas, voire même détériorent les performances des sujets par rapport à un système utilisant un écran classique ou un tablet PC lorsqu'il s'agit de tâches simples de maintenance.

Nous avons donc pour la première version du système utilisé le matériel suivant :

- Un PDA HP IPAQ hw6915 qui tient le rôle de fenêtre augmentée sur l'espace de travail. Ce dispositif est de la dimension de 7,1 x 11,8 cm et d'un poids de 175 g. Ce dernier est équipé d'un processeur Intel PXA270 à 416 MHz avec 192 Mo de mémoire totale. Il est également doté d'une caméra HP Photosmart 1,3 Megapixel, de résolution SXGA 1280 x 1024.
- Un PC HP équipé d'un processeur Intel Pentium 4 Duo-Core à 3,2Ghz d'une carte graphique 3D ATI Radeon PCI 512Mo et d'un contrôleur vidéo ATI Radeon Xpress 200.
- Une caméra USB, une caméra LABTEC, rattachée au PC et filmant la scène visionnée par l'utilisateur. Elle possède une résolution intéressante (640x480) et un capteur VGA jusqu'à trente images par seconde. Ce matériel est le minimum requis pour la capture d'images.

Pour les autres fonctionnalités, le PDA et le PC sont équipés de réseau sans fil WLAN 802.11b à travers des cartes PCMCI, d'écouteurs pour les sorties sonores, d'un GPS pour la localisation (uniquement pour le PDA HP IPAQ)
Le figure 4.3 montre l'ensemble des pièces composant la plate-forme.

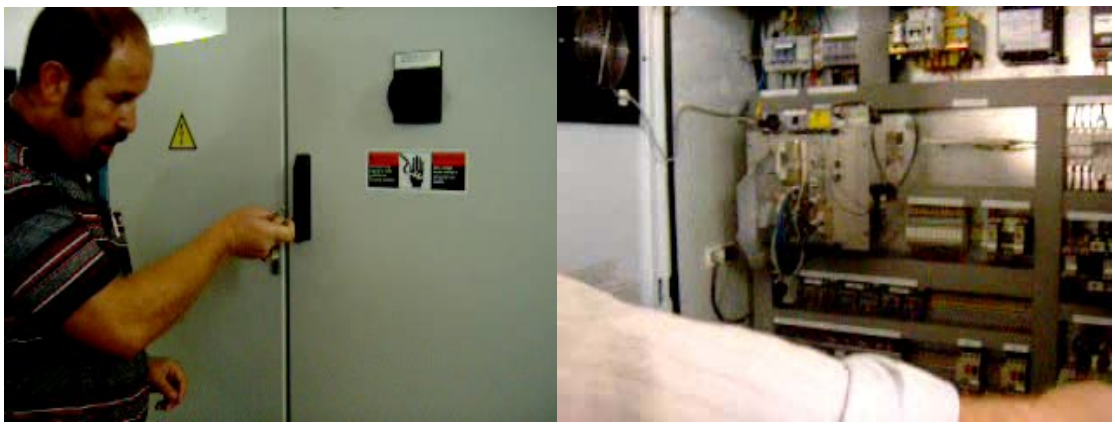


Figure 4. 2. Position de l'opérateur pendant une des phases de la maintenance



Figure 4. 3. Ensemble des pièces composant la plate-forme matérielle.

IV.3.2 Utilisation de la plate-forme matérielle pour la réalisation de trois techniques d'interaction générales

La plate-forme matérielle permet de réaliser trois techniques d'interaction :

- Lorsque l'utilisateur effectue des activités uniquement dans le monde numérique. Il est comme immergé dans ce monde. Toute son attention est prise par l'interaction, il regarde et interagit avec le PDA qui représente une sorte de fenêtre sur le monde numérique que l'utilisateur amène avec lui.
- Lorsque l'opérateur effectue uniquement des activités dans le monde physique. Dans ces conditions, il n'interagit plus avec le monde numérique ou informatique. L'attention de l'utilisateur est centrée sur son environnement physique.
- Lorsque l'utilisateur effectue des activités alliant des entités des deux mondes physique et numérique. La fusion des deux mondes est réalisée grâce à un écran classique et un PDA, où les informations des deux mondes peuvent être superposées.

Utilisée ainsi, la plate-forme matérielle permet de réaliser les trois techniques d'interaction générales. La comparaison est à priori simple à réaliser. Il suffit de placer des images virtuelles sur l'ecran ou le PDA pour pouvoir comparer ces images à des objets physiquement présents.

IV.4 Réalisation logicielle

Dans cette section, nous décrivons la réalisation logicielle en terme d'agents PAC au sein du contrôleur de dialogue CD de notre modèle PAC-

Amodeus étendu aux systèmes de RA. Les règles heuristiques pour la conception d'agents PAC sont décrites par Nigay dans [Nig97].

IV.4.1 Le contrôleur de dialogue CD

Nous avons suivi les règles de conception d'une hiérarchie d'agents PAC pour réaliser le contrôleur de dialogue [ZZA06b] [ZZ07].
C'est au niveau de ces agents que se fait le choix du Noyau fonctionnel *NF* et du Composant Technique de Présentation *CTP* adéquats.
En effet, le *CTP* sollicite l'agent par un simple envoi de message sans même savoir par quel *NF* va se faire le traitement de ce message. De la même manière, les Noyaux Fonctionnels *NF* transmettent aux agents les résultats des traitements sans même savoir quel *CTP* présentera leurs résultats.

En effet, quatre agents apparaissent (Figure.4.4):

1. Un Agent *Réparation* qui gère l'enchaînement des tâches relatives aux scénarios de maintenance. Tout flux d'informations concernant une intervention de réparation pendant une tâche de maintenance transite par cet agent.
2. Un Agent *Base de données BDD* qui gère les tâches concernant l'administration des données liées à la fonction maintenance.
3. Un agent *scénario* qui gère la conception des scénarios, la gestion des différentes augmentations ainsi que toutes les opérations qui leur sont liées telles que la modification ou la suppression d'un scénario (Figure.4.5).
4. Un agent *panne* qui gère les tâches liées aux ordres de réparation que donne l'administrateur ainsi que les informations relatives aux pannes survenues (Figure.4.6)

Ces quatre agents sont regroupés sous un agent PAC ciment chargé d'établir la communication entre les agents eux mêmes ainsi qu'entre les agents et les Noyaux Fonctionnels NF.

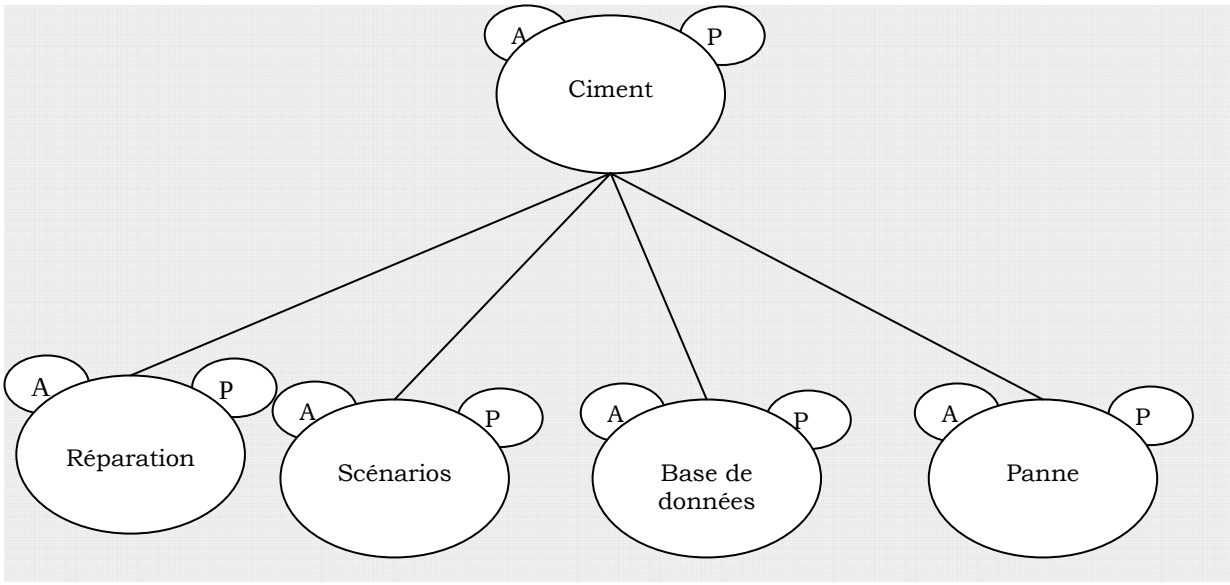


Figure 4. 4. La hiérarchie d'agents PAC peuplant le contrôleur de dialogue du système

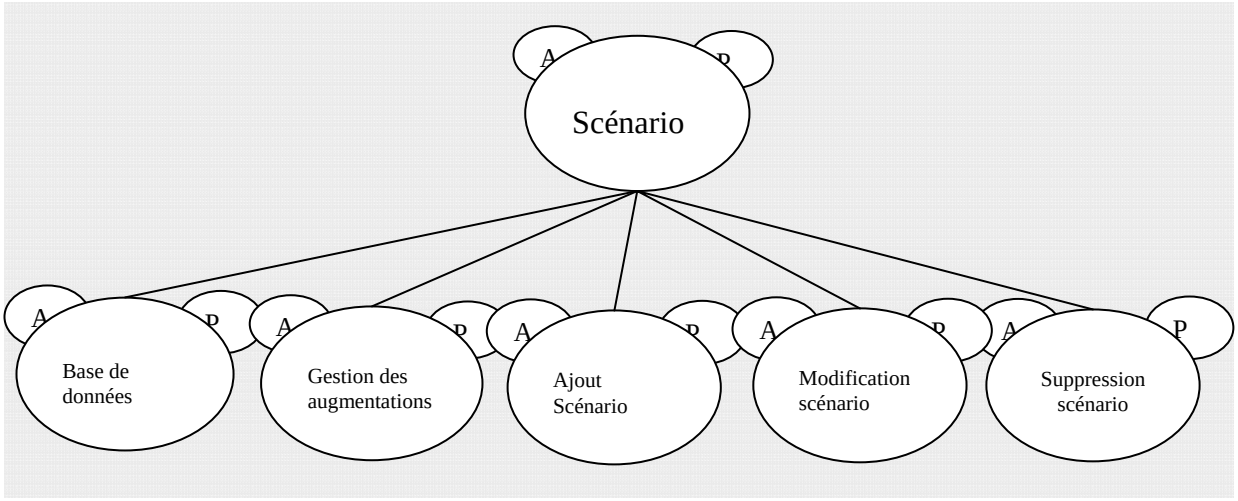


Figure 4. 5. Agent scénario et ses fils

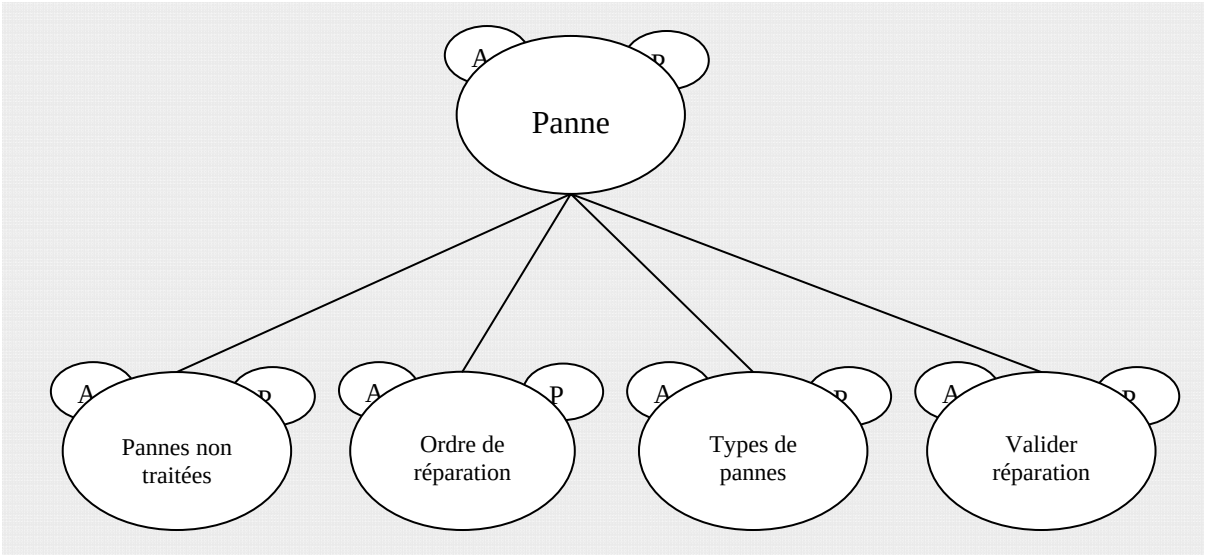


Figure 4. 6. Agent panne et ses fils

Le Contrôleur de dialogue CD est une hiérarchie d'agents PAC. Il a fallu donc trouver la structure de ces derniers en prenant en compte les trois aspects :
1. Autonomie,
2. Hétérogénéité des différents messages reçus,
3. Création / Destruction dynamique des agents

Pour répondre au besoin d'autonomie, l'utilisation des threads est nécessaire. Rappelons qu'un agent PAC est un agent à 3 facettes, P (Présentation), A (Abstraction) et C (Contrôle). Chaque facette a ses propres données et ses propres traitements. Ces traitements sont exécutés par un thread. Ainsi, à chaque facette est associée un thread.
Les facettes communiquent entre elles et avec les facettes d'autres agents. Cette communication ne doit pas être bloquante. Il existe deux moyens principaux de communication inter-thread, les variables globales et la communication par envoi de messages:

1. Les *variables globales* sont un moyen de communication facile à mettre en place. Toutefois leur utilisation devra être faîte avec rigueur pour éviter des problèmes dus à l'accès aux variables partagées. De plus, l'utilisation de variables partagées peut nuire aux performances dans le cas où elles seraient demandées en consultation ou en modification par plusieurs threads simultanément, ce qui traduit un blocage d'une facette de l'agent et par conséquent de l'agent.

2. L'envoi de messages a l'avantage d'être non bloquant, ce qui satisfait le critère d'autonomie. C'est pour ce type de communication que nous optons.

La communication par envoi de messages implique la création d'une boîte aux lettres pour chaque thread (facette). Cette boîte aux lettres doit satisfaire deux critères :

1. Elle doit être hétérogène car elle peut recevoir des messages de n'importe quelle facette et chaque facette peut envoyer une multitude de types de messages. Le type de messages n'est connu par le thread au moment du traitement du message.

2. Les fonctions send() et receive() de la boîte doivent être en exclusion mutuelle. La fonction receive() effectue une lecture consommatrice.

Les agents doivent pouvoir être créés d'une manière dynamique: un agent naît et meurt, ce qui rejoint le concept de l'objet (un objet naît et meurt). Ainsi pour créer un agent, il suffit d'instancier un objet d'une classe. L'objet résultant se charge de créer et de lancer les threads ainsi que de la création des boîtes aux lettres. La durée de vie de l'agent est donc égale à la durée de vie de l'objet.
Un agent PAC est donc matérialisé par :
Trois threads (un pour chaque facette),
Trois boîtes aux lettres (une pour chaque facette),
Un objet (pour la création et la destruction de l'agent).

Le squelette de tous les threads est de la forme suivante :

```
Message mess                    /* Le message*/
Entier code                     /* code contenant le code de traitement*/
Debut
Tant que (5<6)
{
Boite. receive (mess)           /* Récupérer le message */
Code = mess. Recup_codetr()     /* Récupérer le code de traitement*/
    Switch (code)
    {
    case 0 :                    /*traitement 0*/
    break ;
    case 1 :                   /*traitement 1*/
    break ;
    .
    .
    .
    case n :                /*traitement n*/
    break ;
    }
}
```

La boîte aux lettres est un objet instancié de la classe BAL. Les données qu'elle contient sont des objets instanciers de classes dérivées d'une classe abstraite nommée Générique.
La classe Agent X est une classe dérivée d'une classe abstraite nommée Agent.
La classe abstraite Agent est de la forme :

```
            Class Agent
 {
Public :
BAL Boitep /* Boite de la facette P */
BAL Boitea /* Boite de la facette A */
BAL Boitec /* Boite de la facette C */
Vecteur dynamique d'adresses d'agents Hier
/* Hier contient à l'indice 0 l'adresse de l'agent père et dans le reste des
                    indices les adresses des agents fils */

 }
```

Afin que l'implémentation de l'agent soit concrétisée, des concepts propres à la programmation orientée objet (Classes abstraites, héritage,..) et à la

programmation système (synchronisation, exclusion mutuelle) sont utilisés. Pour réaliser ceci, l'outil utilisé pour développer le contrôleur de dialogue est Borland C++ Builder 6.0 sous la plate-forme Windows.
La classe Agent X est de la forme :

```
Class Agent X : dérivée publiquement de Agent
{
Public :
THREAD P /* Thread de la facette P */
THREAD A /* Thread de la facette A */
THREAD C /* Thread de la facette C */
AgentX ( ) /* Constructeur de la classe qui lance les threads */
~AgentX ( ) /* Destructeur de la classe qui détruit les threads également*/

}
```

IV.4.2 Le pilier réel

Le pilier réel de l'arche du modèle d'architecture PAC-Amodeus est composé de cinq branches [ZZA06b](figure 4.7):
La première branche est dédiée à l'interaction du technicien avec l'interface du système. Elle est relative à l'interface graphique permettant l'affichage des différentes augmentations. Elle s'appuie sur une bibliothèque graphique qui en constitue le Composant d'Interaction Bas Niveau CIBN et le Composant Technique de Présentation CTP.
La deuxième branche est nécessaire pour répondre aux sollicitations du technicien à travers des périphériques d'entrée. Parmi ces sollicitations, citons par exemple le passage à l'étape suivante d'un scénario de maintenance, l'avortement ou le changement d'un scénario. Notons que ces deux premières branches sont dédiées à l'interaction du technicien avec l'interface du système.
La troisième branche permet de gérer les données du localisateur qui transmet les coordonnées du technicien par rapport à un référentiel fixe dans l'environnement au Composant Technique de Présentation CTP de l'affichage sans que le Contrôleur de dialogue CD en ait connaissance. Le Composant d'Interaction Bas Niveau CIBN et le Composant Technique de Présentation CTP correspondants à cette branche sont tous les éléments logiciels nécessaires au fonctionnement du localisateur.
Enfin, la quatrième et la cinquième branche sont dédiées à l'interaction de l'administrateur avec le système.

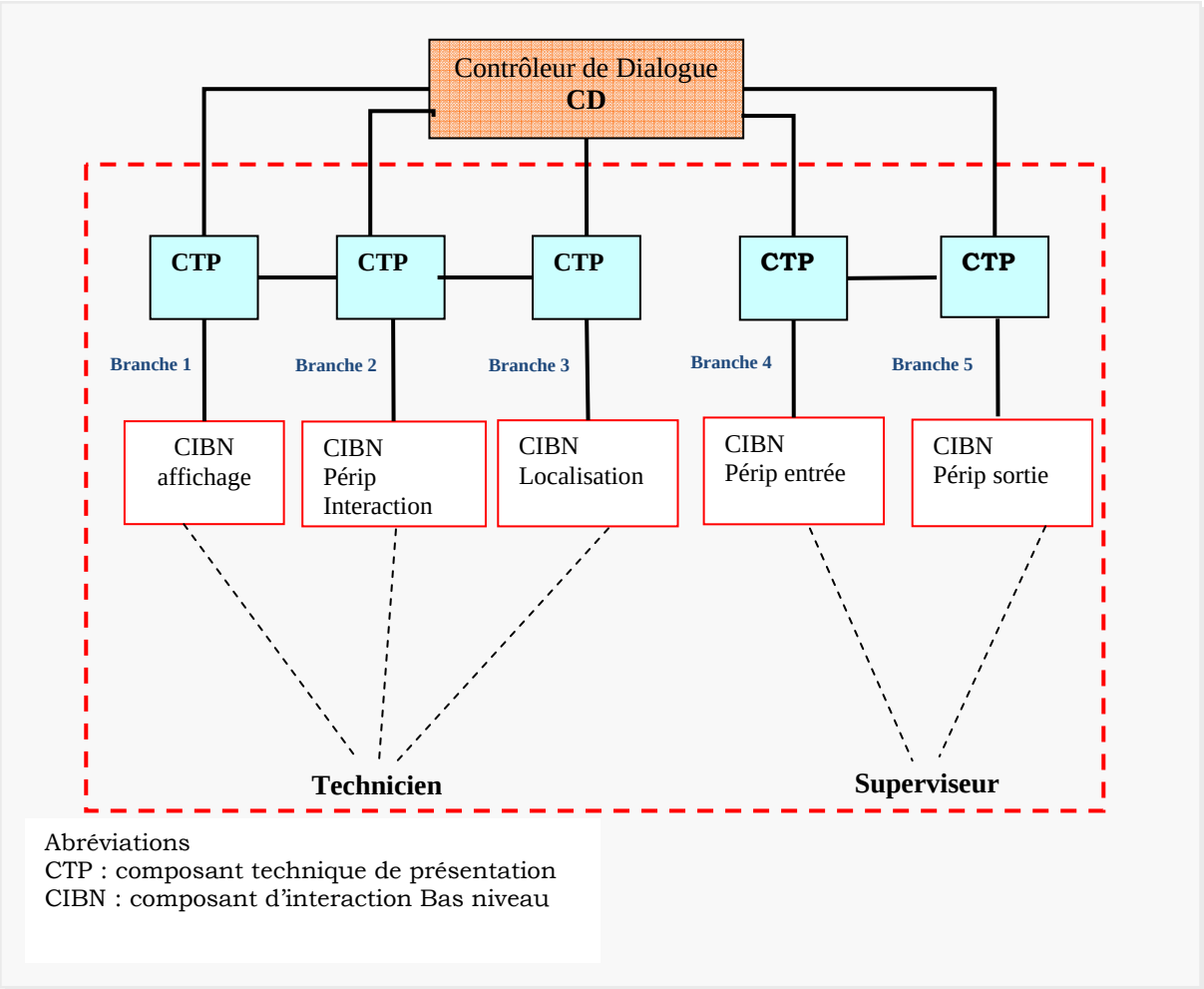


Figure 4. 7. Architecture PAC-Amodeus du système comprenant le pilier réel et le pilier informatique

IV.4.3 Le pilier informatique

La partie fonctionnelle du système est constituée de deux Noyaux Fonctionnels (NF) distincts: le Noyau Fonctionnel Réalité Augmentée Maintenance le *NFRAM* et le Noyau Fonctionnel Système de Gestion de Base de données le *NFSGBD* [ZZA06b] (Figure 4.8):

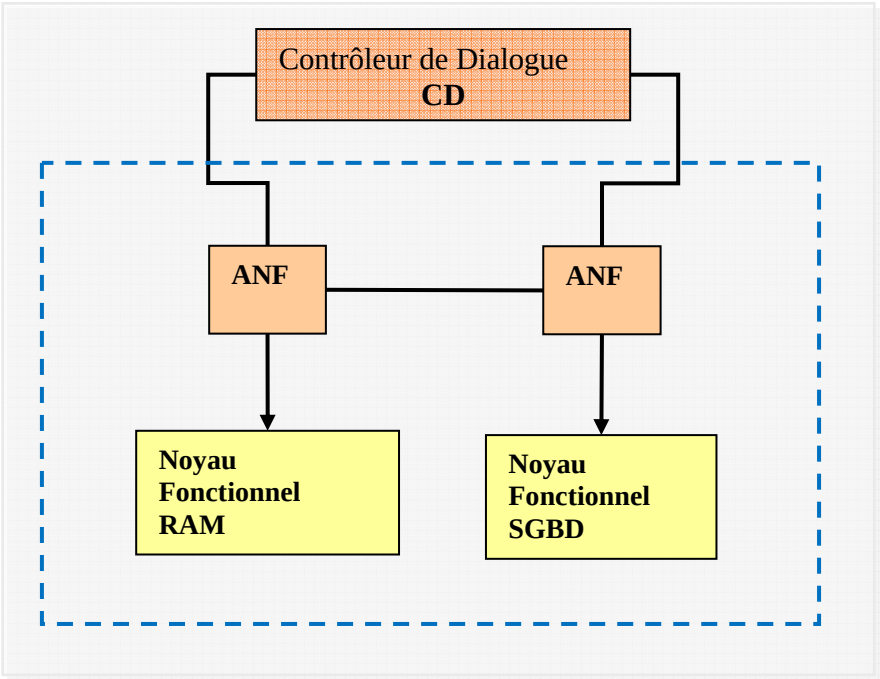


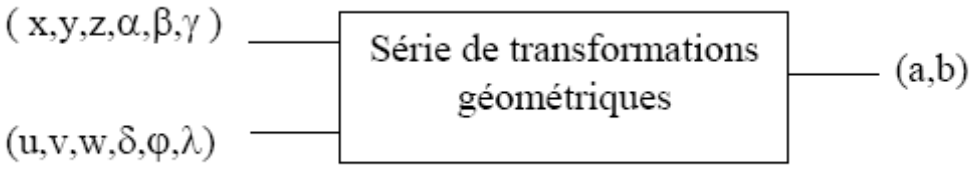
Figure 4. 8. Le pilier informatique du modèle d'Architecture PAC-Amodeus du système

IV.4.3.1 Le NF RAM (Noyau Fonctionnel Réalité Augmentée Maintenance)

La fonction principale du NF RAM est d'intégrer les entités virtuelles au monde réel. Cette intégration diffère en fonction du type d'augmentation. Le problème qui se pose est comment intégrer, où intégrer et quelles méthodes utiliser ?

Notre système utilise trois types d'augmentations : Sonore, Vidéo et image.
Pour intégrer les augmentations de type *sonore* dans l'environnement réel, il suffit de disposer de périphériques qui permettent la diffusion du son comme un casque audio ou des baffles. Pour intégrer des augmentations de type *séquences vidéo*, il suffit d'avoir un périphérique de visualisation comme un écran ou un casque de visualisation. Pour ces deux types d'augmentations la question *où augmenter* ne se pose pas, car pour les informations sonores c'est le sens auditif qui est mis en jeu. Il suffit uniquement de positionner le périphérique de façon à ce que le technicien puisse écouter les instructions. Quant aux séquences vidéo, elles couvrent toute la zone d'affichage du périphérique. Le problème de positionnement de l'augmentation ne se pose également pas.
Pour le troisième type d'augmentation qui est l'image, le positionnement de l'augmentation est crucial, car l'affichage de l'image doit se faire à un endroit précis pour ainsi donner un sens à l'intégration. Si l'image couvrait toute la surface d'affichage, le technicien percevrait alors une image qui lui cacherait son environnement réel. Or une image à elle seule n'a aucun sens, il faut donc l'aligner au monde réel. Une information très importante est à exploiter dans le cas de la maintenance est qu'une augmentation de type image est toujours positionnée au même endroit par rapport à la machine car un

composant a un emplacement fixe dans celle-ci. Il suffit par conséquent d'établir un repère machine et de positionner l'augmentation part rapport à ce repère. Ces coordonnées seront sauvegardées de manière permanente.
Par exemple si la machine cible est une unité centrale d'un ordinateur et l'élément à réparer est le microprocesseur. Nous voudrions faire apparaître l'image du CPU à l'emplacement adéquat. Il suffirait alors de connaître les coordonnées du CPU par rapport à l'unité et faire une série de transformations géométriques qui transformerait ces coordonnées 3D en coordonnées 2D par rapport au repère du périphérique d'affichage en tenant compte de la position du technicien. Si nous avons pour coordonnées de position et d'orientation du technicien (x,y,z,α,β,γ), les coordonnées de l'élément de la machine par rapport à son repère (u,v,w,δ,φ,λ) et les coordonnées de l'augmentation dans le périphérique d'affichage (a,b) alors :



Comme nous constatons, le problème est donc de trouver les bonnes transformations à effectuer et le flux vidéo n'a donc pas à être transmis au système car aucun traitement n'y est effectué. Le Composant Technique de Présentation CTP localisateur envoie au CTP « Affichage » les coordonnées du technicien (x,y,z,α,β,γ) en temps réel et le NF « RAM » envoie au CTP « Affichage » les coordonnées de l'augmentation. Le CTP « Affichage » exécute alors la série de transformations en temps réel afin d'obtenir les coordonnées de l'augmentation au niveau du périphérique d'affichage (a,b).

IV.4.3.2 Le NF SGBD (Noyau Fonctionnel Système de Gestion de Base de Données)

Le NF SGBD gère toutes les données stockées dans la base de données. Ces informations sont représentées dans un modèle Entités/Associations (E/A). Plusieurs entités y figurent.

- Entités *Modèle machine* et *Machine:* elles contiennent les informations concernant les modèles des machines et les informations relatives aux machines (nom de la machine, le fabriquant…) ;
- Entité *Outils*: elle contient toutes les informations relatives aux outils utilisés dans la tâche de maintenance (nom outils, référence…);
- Entité *Technicien*: elle contient toutes les informations relatives au technicien (nom technicien, date de naissance …);
- Entités A_{in}, A_{out}: elles contiennent les informations relatives aux adaptateurs d'entrée et de sortie;
- Entité *Type panne*: elle contient tous les types de pannes des différentes machines;

- Entité *Panne*: elle contient les informations relatives aux pannes survenues dans l'atelier comme le code de la panne, date d'occurrence…
- Entités S*cénario* et *Augmentation:* elles contiennent les informations relatives aux procédures de maintenance.

La figure.4.9 illustre le modèle Entités-Associations (E/A) de la base de données du SGBD du système
Le passage du modèle Entités/Associations de la base de données vers le modèle relationnel s'effectue sous Oracle 9i. Voici quelques tables obtenues : Environnement, Atelier, Modèle Machine, Machine, Outil, Technicien, Ain, Aout, Scénario, Augmentation, Texture, Construire_scénario, Type-Panne, Panne, Panne-Ain, Panne-Aout, Panne-Outil, Panne-Scénario, Panne-Tech, Temps-Minimum-Déroulement, Vue-Machine (voir Annexe A).
Notons que ces tables représentent des tables de la base de données contenue dans le Noyau Fonctionnel NF SGBD implémentées sous Oracle

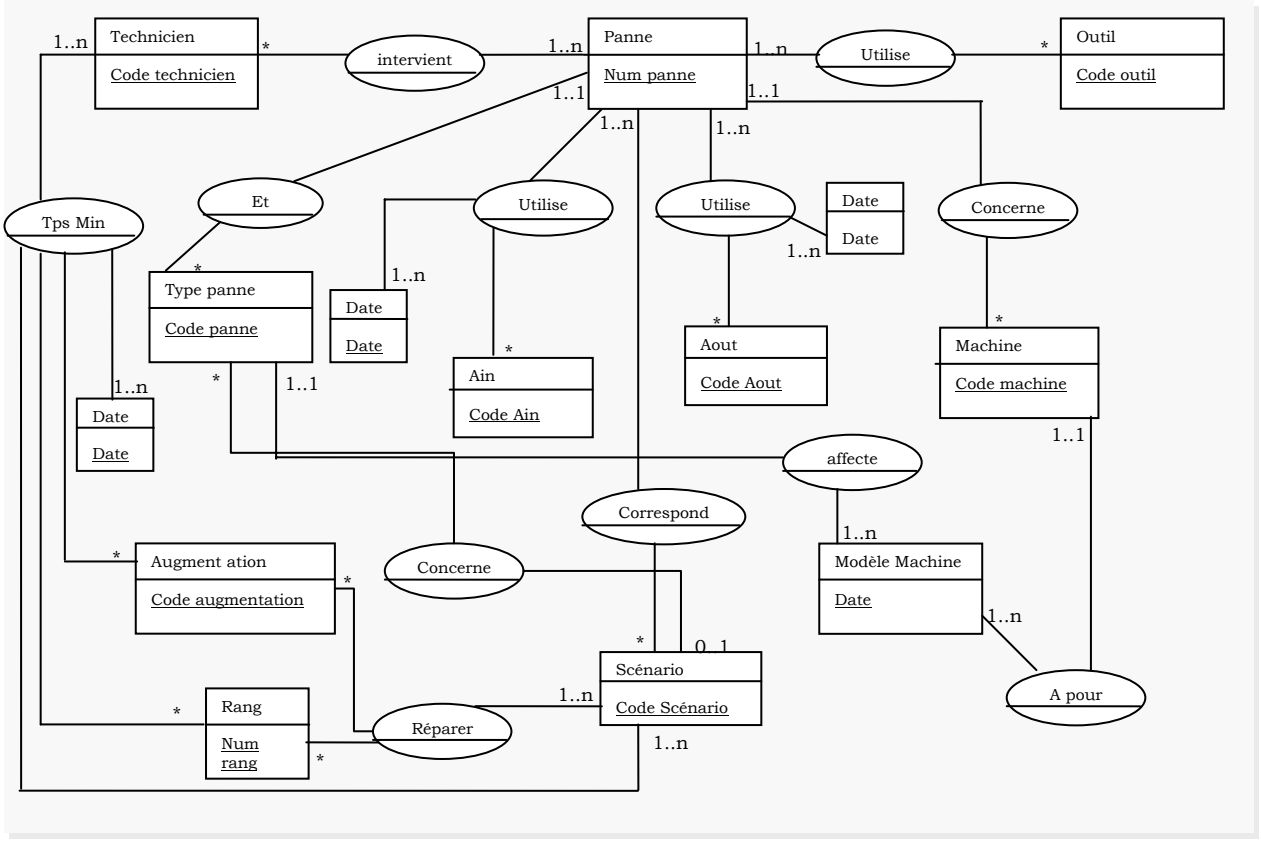


Figure 4. 9. Modèles E/A de la base de données du SGBD du système

IV.5 Traduction des procédures de maintenance sous forme numérique

Nous avons numérisé les procédures de maintenance dans le but de fournir aux techniciens un accès plus simplifié aux documentations techniques. En effet, cette documentation traditionnelle peut être très encombrante et peu facile à consulter. Un avantage supplémentaire à

l'utilisation des procédures de maintenance numériques est qu'elles peuvent nous permettre d'inclure des nouveaux médias qui ne pouvaient pas être exploités dans le cadre des manuels traditionnels. Ainsi, nous pouvons ajouter des vidéos, des commentaires sonores ou même des modèles en trois dimensions avec lesquels il est possible d'interagir. De plus, dans le cadre de notre projet, la RA doit également servir de support en tant que nouveau média à ces procédures numériques.
Nous avons analysé les procédures de maintenance qui nous ont été fourni par des techniciens de l'atelier mécanique du Centre de Développement des Technologies Avancées CDTA.

IV.5.1 Analyse des besoins

L'analyse des besoins pour les opérateurs de maintenance nous a conduit à identifier des points importants pour l'exécution d'une tâche de maintenance. En effet, le technicien doit [ZAZ05] :

- Localiser la zone concernée par la maintenance
- Connaître l'état de la machine avant et après chaque opération
- Reconnaître localement et identifier à tout moment les différentes pièces concernées par la panne et transmettre un rapport à un expert distant.
- Exécuter les différentes étapes d'un scénario de maintenance mis en place afin de réaliser dans les meilleurs délais et au mieux la tâche attribuée au technicien.
- Rédiger un compte rendu comportant un rapport sur les différentes tâches et opérations effectuées et signaler les problèmes éventuels rencontrées ainsi les solutions préconisées.

IV.5.1 Apports d'une application de réalité augmentée exploitant une procédure de maintenance

La RA est un ensemble de technologies qui induisent de nouvelles formes d'Interaction Homme Machine. L'idée d'augmentation introduit la notion de l'enrichissement de l'information véhiculée par les objets virtuels. L'apport de la RA consiste à mettre en adéquation les éléments virtuels avec les éléments du monde réels vues par l'opérateur.
Dés que la position du technicien de maintenance est définie, celui-ci peut intervenir afin d'améliorer sa procédure de maintenance. Une fois la position du mainteneur déterminée par le système informatique, l'opérateur peut faire interagir le monde réel et les modèles virtuels dans le but de faciliter et d'améliorer son apprentissage de la procédure de maintenance.
Dans ce cadre, une fois l'opérateur situé par rapport au monde réel, nous natures (des modèles CAO, des instructions, des images…)

IV.5.2 Analyse d'une procédure de maintenance

Les procédures de maintenance sont caractérisées par un titre se référant à la tâche à effectuer. Elles sont composées d'éléments suivants:

– des consignes de sécurité ou de références à des consignes de sécurité,
– des outils à employer,
– des consommables et des pièces détachées utilisées,
– des directives de maintenance proprement dites.

Nous avons étudié plusieurs procédures de maintenance afin de dégager les actions couramment utilisées. Nous les avons ensuite traduites sous forme d'augmentations multimédia en utilisant des bibliothèques graphiques Glscene.
Nous avons organisé les procédures de maintenance selon trois niveaux de compétence des techniciens:
Niveau 1: technicien expérimenté.
Niveau 2 : technicien moyennement expérimenté.
Niveau 3 : Technicien débutant.

Les directives de maintenance sont organisées hiérarchiquement de manière arborescente. Chaque directive peut être détaillée par une liste de sous-directives, elles-même redétaillées. Si une étape est détaillée par des sous-étapes, alors elle contient un titre générique résumant les sous-étapes. Chaque étape peut contenir également des messages d'avertissement ou des consignes de sécurité qui s'appliquent à chacune de ses sous-étapes également.
Les procédures contiennent également des photographies qui aident les mainteneurs à visualiser la pièce ou les éléments qui sont mentionnés dans la procédure. Le texte de la procédure fait référence aux pièces désignées sur l'image par des numéros. Un certain nombre d'étapes peuvent faire référence à la même image.
Afin de montrer ce qui est réellement fait, nous allons nous appuyer sur des exemples de procédures maintenance simples employées dans le cadre de notre travail.

IV.5.4 Procédures de maintenance : étude de cas

Afin de montrer l'apport de la RA, nous avons étudié plusieurs procédures de maintenance afin de dégager les actions les plus couramment utilisées. Nous les avons ensuite traduites sous forme d'augmentation multimédia en utilisant des bibliothèques graphiques Glscene.
Afin de montrer ce qui a été fait, nous allons nous appuyer sur deux procédures de maintenance employées dans le cadre du projet *ARIMA.* Ces procédures de maintenance s'inscrivent dans un ensemble de documents multimédia qui sont employés par les différents composants dans le cadre du projet.

Afin de montrer ce qui est réellement fait, nous allons nous appuyer sur deux exemples de procédures de maintenance simple effectuées sur un tour numérique de type CNC SOMAB 400.

La procédure (*procédure1*) est effectuée sur un tour numérique de type SOMAB 400. L'action principale consiste à contrôler et remplacer des fusibles de puissance. L'anomalie constatée est l'impossibilité d'actionner la puissance de la machine.
Notons que pour le besoin de la rédaction de la procédure relative à une tâche de maintenance, nous avons procédé à la codification des différentes parties de la machine, de telle sorte que l'opérateur puisse intervenir avec aisance sur la machine.

A1. Couper l'alimentation de la machine en faisant tourner le sectionneur se trouvant dans la zone C en haut à droite vers le bas
A2. Attendre plus de 10 secondes jusqu'à l'arrêt complet de la machine.
A3. Ouvrir la porte se trouvant à l'arrière de la machine dans la zone D. Introduire la clef et faites la tourner d'un demi-tour dans le sens contraire des aiguilles d'une montre ; rester dans cette position et faite tourner avec l'autre main la poignée de 10° vers la droite, puis d'un demi-tour vers la gauche.
A4. Tirer vers vous les deux portes qui vous permettent l'accès à la zone de maintenance.
A5. Rechercher le coffret à fusible portant les références FU33, FU34 et FU35.
A6. Tirer vers vous le porte fusible portant la référence FU33 puis enlever le fusible.
A7. Vérifier que la capsule de sécurité du fusible est toujours présente. Si cela est le cas, le fusible est bon, sinon, procéder à son remplacement par un autre fusible possédant les mêmes caractéristiques.
A8. Refaire l'opération pour les fusibles FU34 et FU35.
A9. Refermer les deux portes donnant accès à la zone de maintenance.
A10. Verrouiller les portes en faisant tourner la poignée d'un demi-tour vers le bas.
……

Comme nous pouvons le constater dans cet extrait de procédure, l'action principale consiste à une vérification stricte des fusibles de puissance.

La seconde procédure (*procédure 2*) utilisée est plus détaillée et dédiée aux techniciens inexpérimentés. Toutes les étapes sont clairement détaillées afin de faciliter au technicien la tâche qui lui est attribuée (voire annexe B). L'anomalie constatée est l'impossibilité de dialoguer avec la machine. Le message d'erreur affichée est "*Global reprom program execution*". Nous donnons dans ce qui suit quelques étapes de la procédure.

Intitulé : *Elimination d'un message de défaut.*
Anomalie : *Impossibilité de dialoguer avec la machine.*
Message d'erreur: " *Global reprom program execution"*

A1.Mettre la machine hors tension et ouvrir la porte se trouvant à l'arrière de la machine
A2.Rechercher la carte électronique dénommée "Mem" dans la partie réservée au bloc "Commande Numérique"
A3.Tirer vers vous la carte
A4.Vérifier visuellement l'état de la carte pour détecter d'éventuelles anomalies.
A5.Si aucune anomalie visuelle n'est constatée enlever la pile au lithium se trouvant sur la carte.
A6.Attendre 20mn le temps nécessaire au condensateur de sécurité de se décharger, ainsi que les" eproms".
A7. …

IV.5.6 Procédure de e-maintenance : étude de cas

Le scénario de e-maintenance exploitée consiste à faire une inscription en ligne sur une application téléchargée par le client à travers une page web dédiée pour le réseau de e-maintenance.
Tout d'abord, le système traite et stocke toutes les informations de cette inscription (le nom, prénom, société, domaine, fonction, niveau, identificateur et mot de passe de client) dans la base de données.
Une fois l'inscription effectuée, le client (technicien ou expert) saisit son identificateur et son mot de passe pour accéder à l'application client. Après chaque connexion, tout acteur peut alors intervenir de manière coopérative dans sa propre session dans l'expertise ou la recherche d'une solution à un problème donné.
La gestion d'une situation de panne sur une intervention de e-maintenance en utilisant notre système se fera en deux étapes :

Première étape : recherche automatiquement de personnes
Une liaison est établie par le serveur avec le personnel habilité et pré-enregistré. Il s'agit de solliciter et d'alerter le personnel de maintenance ou l'expert (local ou distant). Ces messages ciblent le personnel le mieux habilité à intervenir (en fonction de leur domaine compétence,…)

Deuxième étape : processus de maintenance
La maintenance peut se faire à distance à partir d'un poste fixe sur Internet en établissant une connexion initiée par le personnel de maintenance qui a reçu l'alerte et qui permettra la transmission de données informatiques et l'échange de données dans un contexte client – serveur.
Ces données qui représentent les étapes d'un scénario de maintenance sont transmises sous forme d'augmentations multimédia (texte, image, vidéo, son).

IV.5.6.1 Scénario de e-maintenance : étude de cas

Nous présentons dans ce qui suit un exemple de scénario de e-maintenance. La machine cible est une fraiseuse numérique (LAGUN futur 1400 : HEIDENHAIN) (figure 4.10) disponible au niveau de l'atelier mécanique au Centre de Développement des Technologies Avancées CDTA.



Figure 4. 10. La fraiseuse numérique « LAGUN »

Au démarrage de la machine, un message d'erreur est affichée sur l'écran de la partie « Ecran et commande fonctionnelle » (figure 4.11.)



Figure 4. 11. Le message d'erreur affiché

Le technicien par manque de compétence accède à l'application client serveur et contacte un expert distant.
Un rapport de panne est rempli par le technicien. Le serveur prend alors le relais, enregistre ce rapport dans la base de données et recherche les experts susceptibles de résoudre le problème posé par le technicien (Figure4.12)

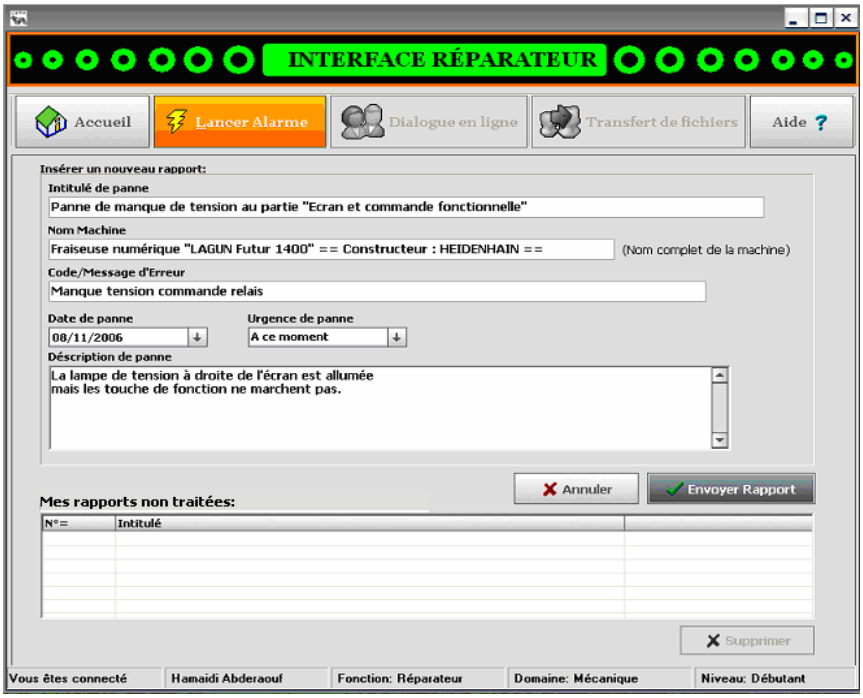


Figure 4. 12. Page « Lancer Alarme » dans l'interface réparateur

Les experts en ligne sont informés instantanément, les autres sont prévenus par un message à chaque connexion.
L'expert en ligne contacté, lit d'abord le rapport (ou les rapports) envoyé(s) comme le montre la figure 4.13.

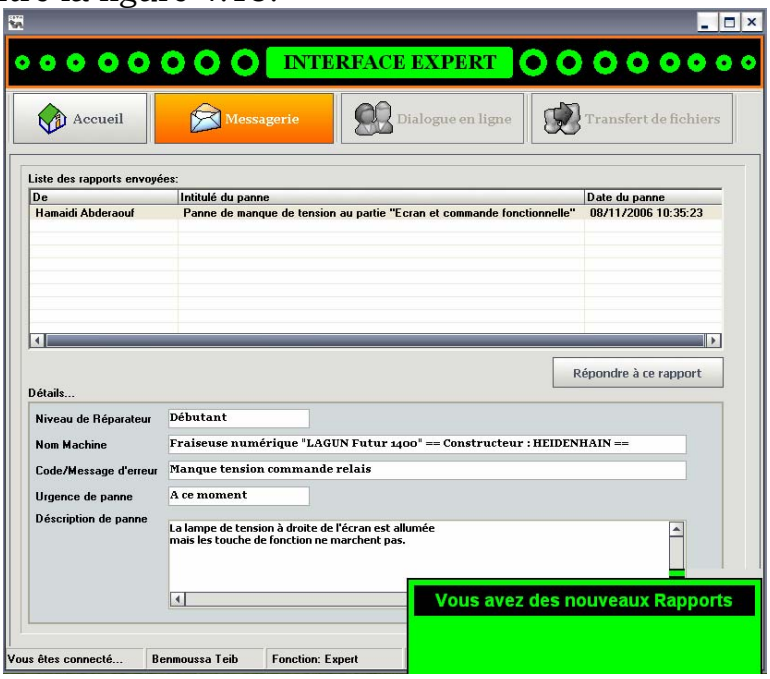


Figure 4. 13. Interface expert

L'expert sélectionne un rapport dans la liste des rapports puis choisit l'option « Répondre à ce rapport ».
Le serveur établit alors la connexion entre les deux clients (l'expert et le technicien).
A cet effet, différents outils de communication sont mis à sa disposition : le dialogue en ligne et le transfert de fichiers,…
Nous avons choisi comme outil de communication entre l'expert et le technicien, le dialogue en ligne.
Voici en quelques lignes un extrait d'un dialogue effectué entre le technicien et l'expert.
a. Expert :
Votre machine est-elle sous tension ?
b. Technicien :
Oui, la machine est sous tension mais le problème reste posé.
a. Expert :
Couper l'alimentation de la machine avec le sélectionneur se trouvant dans la partie « armoire électronique » et vérifier que le témoin d'alimentation est éteint (figure 4.14).



Figure 4. 14. Augmentation indiquant au technicien comment couper l'alimentation

b. Technicien :
L'arrêt de la machine est réussi.
a. Expert :
Accéder à la partie « Armoire électronique », insérer la clef et déverrouiller la porte (figure 4.15)



Figure 4. 15. Exemple d'une augmentation montrant au technicien comment déverrouiller la porte

a. Expert :
Accéder maintenant à la boîte des fusibles de tension et tirer vers vous en deux étapes la tige de cette boîte.
b. Technicien :
La boîte des fusibles est ouverte.
a. Expert :
Enlever et vérifier un à un les trois fusibles avec un metrix (figure 4.16).



Figure 4. 16. Augmentation indiquant au Technicien les trois fusibles.

…
Le technicien termine la session et l'expert remplit le rapport de fin de session qui contient les détails sur la panne tels que le dialogue effectué sur cette panne, les fichiers transférés de l'expert vers le technicien, la cause de

panne et le résumé de solution. Ce rapport sera ensuite envoyé au serveur pour être classé puis archivé dans la base de données et la base de connaissances.

IV.6 Conclusion

Ce chapitre consacré au système ARIMA, que nous avons développé dans le cadre de cette thèse, couvre toutes les étapes du cycle de vie logiciel de la conception à la réalisation.

Nous avons tout d'abord analysé dans ce chapitre les apports des technologies de la RA dans un processus de maintenance. Au-delà des aspects d'utilité et d'utilisabilité de la RA, nous avons remarqué que cette technologie se révèle avantageuse pour des tâches demandant une application stricte de procédures. En revanche, ce phénomène peut être une contrainte dans des contextes de travail hautement dynamiques. D'un point de vue méthodologique, nous avons constaté que les tests utilisateurs ont un apport indéniable à l'évaluation de la compatibilité de l'application à la tâche de maintenance.

Nous avons ensuite détaillé la réalisation logicielle. Nous avons souligné les apports du modèle PAC-Amodeus adapté à la réalisation de notre système de RA. Plusieurs aspects logiciels ont été détaillés notamment la réalisation logicielle en terme d'agents PAC au sein du contrôleur de dialogue CD de notre modèle PAC-Amodeus.

De plus, nous avons numérisé les procédures de maintenance et de e-maintenance dans le but de fournir aux techniciens un accès plus simplifié aux documentations techniques. Nous avons donc étudié la structure interne de ces procédures que nous avons transformées et mises dans un format numérique. Leur contenu est alors lié à des documents multimédias (sons, images, videos, modèles 3D, etc…) qui sont ensuite exploités par notre système.

Les premiers tests ont été conduits avec un technicien. Nous avons ensuite conduit une évaluation expérimentale. Celle-ci vise à établir l'utilisabilté d'un système de RA combinant les deux mondes réel et virtuel. Les travaux accomplis jusqu'à présent nous ont permis de construire un ensemble cohérent constitué d'un modèle de l'interaction et d'une première version d'une méthodologie de conception d'un système supporté par la RA pour l'aide à la maintenance.

Les résultats préliminaires semblent satisfaisants, néanmoins, nous envisageons de consolider cette validation par une extension de ces expérimentations.

La profonde méditation donne le moyen de tromper le temps, de considérer comme simultané tout ce qui a été, tout ce qui est et tout ce qui sera dans l'avenir, et comme tout cela est parfait.
(Siddharta)
____Hesse, Hermann

Conclusion Générale et Perspectives

Nos travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'Interaction Homme-Machine (IHM) et contribuent à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée dans le cadre précis de la maintenance industrielle. Dans cet axe de recherche de l'IHM, les avancées sont importants et se manifestent par de nombreux systèmes présents dans des domaines aussi diverses que la médecine, la maintenance, la robotique… Nous proposons en conclusion, un résumé de nos contributions et identifions plusieurs perspectives à nos travaux.

1. Résumé de nos contributions

Nos travaux de recherche contribuent à la conception et à la réalisation des systèmes de réalité augmentée pour l'aide à la maintenance. En accord avec notre démarche scientifique, une première contribution est d'ordre terminologique et consiste à dresser un état de l'art sur les systèmes de réalité augmentée ainsi que sur les modèles d'Interaction Homme-Machine. Le domaine cerné, nos contributions scientifiques concernent alors la conception ergonomique, la modélisation du système de réalité augmentée et la conception logicielle. Enfin nos contributions logicielles résident dans un système de réalité augmentée développé et testé.

Un bilan analytique sur les systèmes de RA exposé dans le *Chapitre I* nous a conduit à dresser un état de l'art sur le paradigme de la RA et ses applications dans des domaines aussi divers que la médecine, l'architecture, l'éducation, l'archéologie, la maintenance ou encore la bureautique. Cette revue et ce recensement nous ont particulièrement permis de mettre en exergue les différents points de vue que le concepteur peut choisir pour aborder l'analyse ou la conception d'un système.

Nous avons passé en revue dans le *chapitre II* plusieurs modèles d'interaction Homme-Machine. Ces modèles apparaissent incomplets par rapport à la modélisation des systèmes de RA car ils sont conçus pour la modélisation du logiciel et ne prennent pas en compte les entités réels. Néanmoins, seuls deux modèles apparaissent comme éléments dédiés pour prendre en compte les spécificités interactives des systèmes de RA. Ce sont les modèles ASUR et IRVO. Cette analyse a constitué notre point de départ pour proposer le modèle UML qui représente notre première contribution dans cette thèse. Les modèles classiques d'architecture logicielle apparaissent eux aussi inadaptés à la prise en compte de la RA. Le modèle Pac-Amodeus préconise des solutions pour palier à des limitations. Cette conclusion nous a conduit à proposer une extension du modèle Pac-Amodeus adapté à notre système de RA.

Le chapitre III de cette thèse synthétise notre contribution scientifique. Nous avons à cet effet proposé une démarche de conception ergonomique pour les systèmes de RA. Dans cet axe, nous présentons les propriétés ergonomiques. Notre première contribution, la notation UML permet de décrire l'interaction de l'utilisateur avec les deux mondes réel et virtuel en échangeant des données à travers des adaptateurs d'entrée et de sortie. Pour compléter la notation de la description UML, support de conception, nous avons fournis des caractéristiques ergonomiques propres aux entités rattachées à l'utilisateur et aux relations qui les lient à ce dernier. Poursuivant le cycle de vie d'un système interactif issu du génie logiciel, nous avons abordé l'étape de la conception logicielle du système de RA. Pour ce faire, nous avons défini une solution générique de réalisation logicielle selon le modèle d'architecture logicielle PAC-Amodeus adapté à notre système de RA. Cette adaptation représente notre seconde contribution dans la réalisation logicielle de systèmes interactifs. Ce modèle adapté souligne la dualité de l'interaction avec deux branches indépendantes dédiées à l'interaction avec le monde réel et le monde informatique. D'après la définition des composants du modèle PAC-Amodeus, le Composant Technique d'Interaction CTP assure l'indépendance entres les objets d'interaction composant le pilier réel du modèle PAC-Amodeus. Cette indépendance entre les Composant Technique d'Interaction des branches associées aux différents adaptateurs nous a permis de favoriser donc la modifiabilité des codes.

Nous avons examiné dans le chapitre IV les concepts développés en les mettant en œuvre dans des réalisations logicielles. La troisième contribution concerne l'exploration industrielle de l'idée de la thèse. Il s'agit du projet *ARIMA* mené en collaboration avec le Laboratoire d'Automatique de Besançon, le LAB et la DCNS dans le cadre du projet Nemosys (Naval E-Maintenance Oriented SYstem and Services). L'objectif est de mettre en place une plate-forme de e-maintenance basée sur le concept de la réalité augmentée pour l'aide à l'intervention.

La réalisation logicielle nous a permis de valider le modèle PAC-Amodeus adapté à la réalisation de notre système de RA. Plusieurs aspects logiciels ont été détaillés notamment la réalisation logicielle en terme d'agents PAC au sein du contrôleur de dialogue CD de notre modèle PAC-Amodeus.

Les travaux accomplis jusqu'à présent nous ont permis de construire un ensemble cohérent constitué d'un modèle de l'interaction et d'une première version d'une méthodologie de conception d'un système supporté par la RA pour l'aide à la maintenance. Les résultats préliminaires nous ont servi de valider expérimentalement une partie de nos apports. Cette première expérience est satisfaisante. Outre les améliorations à apporter au système *ARIMA*, nous envisageons plusieurs perspectives de natures scientifiques et technologiques.

2. Perspectives scientifiques et technologiques

La remarque importante que nous pouvons faire et que, malgré les résultats satisfaisants obtenus, il reste néanmoins plusieurs points à traiter.

1. Conduire de nouvelles expérimentations afin de valider l'intégralité de nos résultats de conception. L'objectif sera aussi de comparer la qualité de réalisation des tâches de maintenance.

2. Effectuer des tests supplémentaires axés principalement sur le temps de réalisation des tâches et le nombre d'erreurs. Faire des évaluations sur le terrain. Celles-ci se traduisent par des questionnaires et des entretiens. L'intérêt porte sur la satisfaction des utilisateurs et leur impression générale de la facilité d'utilisation des dispositifs.

3. Apporter des modifications au système afin de pouvoir le transposer dans le cadre de la problématique en réalité augmentée lors de l'utilisation d'un casque semi-transparent. Il s'agit dans ce cas de développer un système de calibration qui permet de calculer le point de vue de l'utilisateur par rapport au casque et de mettre en place un système de recalage dynamique pour la réalité augmentée qui permet de suivre et d'estimer efficacement la tête d'un utilisateur. Cette approche est basée sur l'utilisation d'un filtre particulaire pour réaliser la fusion entre les données issues d'un système de localisation. Enfin, il convient d'effectuer une évaluation ergonomique afin d'établir l'impact de l'utilisation de ce types de dispositifs sur le comportement de l'utilisateur.

4. Construction d'un système de gestion des augmentations. Il s'agit en particulier dans le cadre de la préparation des modèles 3D pour la Réalité augmentée. Gérer le problème des occultations du virtuel par le réel qui est un des problèmes majeurs dans tout système de RA

5. Prendre en considération les aspects collaboratifs pour la réalisation des tâches de maintenance. En effet, le technicien réalise sa tâche de maintenance au sein d'un groupe de maintenanciers. La commuincation entre les differents opérateurs mais surtout la capacité de chacun d'eux d'apprécier l'état d'avancement de l'opération de maintenance est un élement important pour garantir une bonne coordination entre les différents techniciens.

Enfin, le système que nous avons proposé est adapté aux environnements de travail restreints. Nous envisageons à long terme l'utilisation de capteurs supplémentaires pour des applications de RA en extérieur.

Références Bibliographiques

[ABM+05] **Anastassova M., Burkhardt J.-M., Mégard C., Ehanno C.**, "*Results from a user-centred critical incidents study for guiding future implementation of augmented reality in automotive maintenance*", International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 35, n°1, 2005, pp. 81–91.

[ACN92] **Abowd D., Coutaz J., Nigay L.**, "*Structuring the Space of Interactive Properties*", Acte de la conférence EHCI'92, 1992, pp.113-128.

[Ali98] **Alissali M.**, *« Support de cours introduction au génie logiciel »*. Internet. (http:// www-ic2.univ-lemans.fr/ ~alissali/ Enseignement/ Polys/ GL/ gl.html), 1998.

[Azu97] **R T Azuma.,** "*A Survey of Augmented Reality*", Presence: Teleoperators and Virtual Environments. 6, 4 (August 1997), 355 - 385. Earlier version appeared in Course Notes #9: Developing Advanced Virtual Reality Applications, ACM SIGGRAPH '95 (Los Angeles, CA, 6-11 August 1995), pp.1-38.

[Bau95] **Baudel T.,** « *Réalité Augmentée : pour une définition et une nouvelle dénomination du domaine* », 1995. Available from Internet : http://www-ihm.lri.fr/~thomas/Docs/ra.html

[BB01] **Beaudoux O., Beaudouin-Lafon M.,** *"DPI: A Conceptual Model Based on Documents and Interaction Instrumentisé"*, In People and Computers XV - Interaction without frontiers (Joint proceedings of HCI 2001 and IHM 2001, Lille, France), pp 247-263, Springer Verlag, 2001.

[Bea94] **M. Beaudouin-Lafon.,** *"Beyond the Workstation: Mediaspaces and Augmented Reality"*, In Proc.HCI'94, People and Computers IX, Cambridge University Press, 1994, pp 9-18.

[Bea00] **Beaudouin-Lafon M.,** *"Instrumental Interaction: an Interaction Model for Designing Post-WIMP Interfaces"*, In *Proceedings of ACM Human Factors in Computing Systems, CHI'2000*, The Hague (Netherlands), April 2000, ACM Press, pages 446-453 Online:http://www.daimi.aau.dk/CPnets/CPN2000/download/chi2000.pdf

[Ber94] **Bernsen O.,** "*Foundations of multimodal representations. A taxonomy of representational modalities*", Revue Interacting with Computers, vol. 6, n°4, 1994, p.347-371.

[Ber03] **F Bérard.,** "*The Magic table computer-vision based augmentation of a white board for creative Meetings",* Proc Cam workshop, in the CD-Rom proceedings of the IEEE international Conference in Computer Vision, 12 Octobre 2003, Nice France.

[BFL+92] **Bass L., Faneuf R., Little R., Mayer N., Pellegrino B., Reed S., Seacord R., Sheppard S., et Szczur M.,** *"A Metamodel for the Runtime Architecture of an Interactive System",* Journal, ACM Special Interest Group Computer-Human Interface bulletin (SIGCHI), vol.24, n°1, 1992, p.32-37.

[BGH02] **Bowman D., Gabbard J., & Hix D.,** "*A survey of usability evaluation in virtual environments: classification and comparison of methods",* Presence : Teleoperators and Virtual Environments, vol.11, 2002, p.404-424.

[BKH+99] **Baber C., Knight J., Haniff D., & Cooper L.,** "*Ergonomics of wearable computers"*, Mobile Networks and Applications, vol.4, 1999, pp.15-21.

[BMD97] **Bowskill J., Morphett J., Downie J.,** "*A taxonomy for Enhanced Reality Systems",* In *Proceedings of the First International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97)*, IEEE Computer Society, 1997.

[BNR+02] **Bouchet J., Nigay L., Renevier P., Pasqualetti L., «** *Troc: un jeu collaboratif sur support mobile exploitant des techniques de réalité augmentée ».* Colloque sur la mobilité, GDR-I3, 6 décembre 2002, LORIA, Nancy. 2 pages.

[Boe81] **Boehm B.,** "*Software Engineering Economics"*, 767 pages, Prentice-Hall, 1981.

[CD04] **Chalon R., David D.,** *"IRVO: an Architectural Model for Collaborative Interaction in Mixed Reality Environments"*, *Actes du Workshop MIXER, IUI-CADUI*, Madère, 2004.

[Cha04] **Chalon R.,** « *Réalité Mixte et Travail Collaboratif : IRVO, un modèle de l'Interaction Homme – Machine »*, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, décembre 2004, 214 pages.

[CN01] **Coutaz J., Nigay L.,** « *Architecture logicielle conceptuelle des systèmes interactifs »,*. In Kolski C. (Ed.), Analyse et conception de l'IHM. Hermès, Paris, chapitre 7, ISBN 2-7462-0239-5, pp. 207-246.

[Cou87] **J. Coutaz.,** "*PAC, an Implementation Model for Dialog Design"*, Proc. of Interact'87, Stuttgart, Sept. 1987, 431-436.

[Cou88] **J. Coutaz.,** « *Interface Homme-Ordinateur: Conception et réalisation »,* Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, Décembre 1988.

[DFA+98] **Dix A., Finlay A., Abowd G., Beale, R.,** *Human-Computer Interaction*, 2ème Edition, Prentice Hall, 1998.

[Did05] **Didier J.,** « *Contributions à la dextérité d'un système de réalité augmentée mobile appliqué à la maintenance industrielle* », thèse de doctorat Université d'Evry, 2005, 193 pages.

[DNT+99] **Dubois E., Nigay L., Troccaz J., et al.,** "*Classification Space for Augmented Surgery, an Augmented Reality Case Study",* In Proceedings of INTERACT'99, Edinburgh, September 1999. pp 353-359.

[DNT01] **Dubois E., Nigay L., Troccaz J.,** "*Consistency in Augmented Reality Systems",* In Proceedings of EHCI'01, IFIP WG2.7 (13.2) Conference, Toronto, May 2001, LNCS 2254, Spinger-Verlag. Available from Internet: http://iihm.imag.fr/publs/2001/EHCI01_DuboisNT_ConsistencyInAR.pdf

[DNT02] **Dubois E., Nigay L., Troccaz J.,** "*Assessing continuity and compatibility in augmented reality systems*", International Journal on Universal Access in the Information Society, special issue on Continuous Interaction in Future Computing System, 2002, pp. 263-273.

[DRM+05] **Didier J.-Y., Roussel D., Mallem M., Otmane S., Naudet V., Pham Q.-C., Bourgeois V., Mégard V., Leroux V., et Hocquard V.,** *"Amra : Augmented reality assistance in train maintenance tasks"*, Dans Workshop on Industrial Augmented Reality (ISMAR'05), Vienne, Autriche, 5-7 Octobre 2005.

[Dub01] **Dubois E.,** « *Chirurgie Augmentée, un cas de réalité augmentée; conception et réalisation centrées sur l'utilisateur* », thèse de doctorat université Joseph Fourier, Grenoble I, Juillet 2001.

[Dub02] **Dubois E.,** *« Asur: un point de départ pour fédérer différents aspects de la conception d'un système interactif mobile »,* Colloque sur la mobilité, GDR-I3, 6 décembre 2002, LORIA, Nancy. 2 pages.

[Ede02] **Alt, T., Edelmann, M., et al.,** *„Augmented Reality for Industrial Applications – A New Approach to Increase Productivity",* Proceedings of the 6th International Scientific Conference on Work With Display Units, 2002.

[FLB+02] **Fjeld M., Lauche K., Bichsel M., Voorhorst F., Krueger H., Rauterberg M.,** *"Physical and Virtual Tools: Activity Theory Applied to the Design of Groupware",* In Nardi B. A. & Redmiles D. F. (eds.): Activity Theory and the Practice of Design, Computer Supported Cooperative Work (CSCW), vol 11, 2002, Kluwer Academic Publishers, pp. 153-180.

[FMH+97] **Feiner S., MacIntyre B., Höller T.,** *"A Webster. A touring Machine: prototyping 3d Mobile augmented reality system for exploring the urban Environment",* In proc ISWC'97 (International Symposium on Wearable Computing), Cambridge, MA, Octobre 13-14, 1997, pp.4-81.

[FMS93] **Feiner S., MacIntyre B., D Seligmann D.,** *"Knowledge-Based Augmented Reality",* Communication de l'ACM, n°7, 1993, pp.53-61.

[FMA+03] **Fuchs P., Moreau G., Arnaldi B., Burkhardt J.M., Chauffaut A., Coquillart S., Donikian S., Duval T., Grosjean J., Harrouet F., Klinger E., Lourdeaux D., Mellet d'Huart D., Paljic A., Papin J.P., Stergiopoulos P.,**

Tisseau J., Viaud-Delmon I., « *Le Traité de la réalité virtuelle »,* deuxième édition, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, deuxième édition, 2 volumes, ISBN 2-911762-47-9 et 2-911762-48-7, 915 pages, http://caor.ensmp.fr/interlivre, septembre 2003.

[FSA+05] **Fawad K.M., Selami D., Adel M., Jessen G., Schiemann, Mirko S., Hanns A., Stefan W., Georgios S., Thomas J.,** "*Accuracy of biopsy needle navigation using the Medarpa system-computed tomography reality superimposed on the site of intervention"*, European Radiology 15 (2005), 11, pp. 2366-2374.

[FSG+05] **Freudenthal A., Samset E., Gersak B., Declerck J., Schmalsieg D., Casciaro S., Rident O., Vander Sloten J.,** "*Augmented Reality in Surgery ARIS*ER, Research Training Network for Minimally Invasive Therapy Technologies"*, Endoscopic Review, Vol. 10, No. 23, 2005

[FVB+00] **Fjeld M., Voorhorst F., Bichsel M., Krueger H., Rauterberg M.,** *"Navigation Methods for an Augmented Reality System",* In the video program / extended abstracts of CHI2000, pp. 8-9.

[GD01] **Gleue T., Daehne P.,** "*Design and Implementation of a Mobile Device for Outdoor Augmented Reality in the ARCHEOGUIDE Project,*" Virtual Reality, Archaeology, and Cultural Heritage International Symposium (VAST01), Glyfada, Nr Athens, Greece, 28-30 November 2001.

[GGZ+03] **Goose S., Guven S., Zhang X, Sudarsky S. Navab N.,** "*Mobile 3D Visualization an Interaction in an Industrial Environment",* In Stephanidis C. (Eds), Universal Access in HCI, Inclusive Design in the Information Society, Proc. of HCI International, 22-27 June 2003, Crete, Greece, London : Lawrence Erlbaum Associates, 2003, vol. 4, pp. 379-383.

[GKG+03] **Goebbels G., Kruijff E., Galunic G., Orthey T., Ivanovic A., and Sanfilippo L.,** *"Ofuturo - a mixed reality desk environment for supporting creativity methods"*, In Symposium on Virtual Reality (SVR), 2003.

[GMS+03] **Granum E., Moeslund T.M., Stoerring M., Broll W., and Wittkaemper M.,** *"Facilitating the presence of users and 3d models by the augmented round table"*, In PRESENCE Conference, Aalborg, Denmark, October 2003.

[GRAM96] *« Groupe de Recherche des Arts Médiatiques. Dictionnaire des arts médiatiques »*, GRAM, Université du Québec à Montréal, 1996. on-line : http://www.comm.uqam.ca/~GRAM

[Gre85] **Green M.,** *"Report on Dialogue Specification Tools"*, Journal, User Interface Management Systems (UIMS), Eurographics Seminars, 1985, pp 9-20, Springer-Verlag.

[GSZ+03] **Goose S., Sudarsky S., Zhang X., Navab N.,** *"Speech-Enabled Augmented Reality Supporting Mobile Industial Maintenance"*, In Pervasive Computing, January-March 2003, vol. 2, n° 1, IEEE Computing Society, pp. 65-70.

[GWL+99] **Gumprecht H., Widenka D., Lumenta C., Macunas R., Barnet G., Kelly P., and Roberts D.,** *"Brainlab vectorvision neuronavigation system:technology and clinical experiences in 131 cases"*, Neurosurgery, 44(1) pp.97-105, 1999.

[Gra96] **Gram C., Cockton G.,** "*Design Principles for Interactive Software",* Chapman & Hall, 248 pages, 1996.

[GWC+00] **Graham T. C. N., Watts L., Calvary G., Coutaz J., Dubois E., Nigay L.,** *"A Dimension Space for the Design of Interactive Systems within their Physical Environments"*, Acte de la conférence DIS'2000, 2000, p. 406-416.

[HHN86] **Hutchins E. L., Hollan, J. D., Norman D.A.** *"Cognitive Engineering"*, In Norman D.A., Draper S. W. (Eds), User Centered System Design. New Perpectives on Humann- Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, 1986, chapter 5, pp. 87-124.

[KBM+99] **Kerrien E., Berger M-O., Mauricomme E., Launay L., Vaillant R., Picard L.,** *"Fully automatic 3D/2D Substracted Angiography Registration",* In Proceeding of Medical Computing and Computer- Assisted Intervention (MICCAI'99), 1999, pp.664-671.

[KHN+03] **Kobayashi K., Hirano M., Narita A., Ishii H**., "*A tangible interfaces for IP Network Simulation",* CHI 2003, avril 5-10, 2003, FT Lauderdale, Florida, USA, ACM 1-58113-630.7/03/0004.

[Kli99] **Klinker G.,** *"Augmented reality: a problem in need of many computer vision-based solution"*, .NATO Advanced Research Workshop at the 8. International Conference on the Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP-99), Ljubljana Slowenia, Août, 1999, pp.29-31.

[KP88] **Krasner G., et Pope S.,** *"A Cookbook for Using the Model-View-Controller User Interface Paradigm in Smalltalk-80",* Journal of Object Oriented Programming (JOOP), vol.1, n° 3, 1988, pp. 26-49.

[KSR01] **Kliner G., Stricker D., Reiners D.,** "*Augmented reality for exterior Construct Applications",* Augmented Reality and Wearable Computers, w. Barfield and Caudell .ed. lawrence Erlbaum press, 2001.

[KTN+03]. **Kato H., Tachibana K., Nakajima T., Fukuda Y., Tananbe M., Cheok A.** *"D. Collaborative City-Planning System based on Augmented Reality",* In Jacko J. & Stephanidis C. (Eds), Human-Computer Interaction Theory and Practice, Proc. of HCI International, 22-27 June 2003, Crete, Greece, London : Lawrence Erlbaum Associates, vol. 1, pp. 1153-1157.

[KTY99] **Kiyokawa K., Takemura H., Yokoya N.,** *"SeamlessDesign: A Face-to-Face Collaborative Virtual/Augmented Environment for Rapid Prototyping of Geometrically Constrained 3-D Objects",* ICMCS, Vol. 2, 1999, pp. 447-453.

[KTY00] **Kiyokawa K., Takemura H., Yokoya N.,** *"SeamlessDesign for 3D Object Creation"*, IEEE MultiMedia vol 7(1), 2000, pp.22-33.

[Mac96] **Mackay W.E.,** « *Réalité Augmentée : le Meilleur des Deux Mondes* », La Recherche n°285, 1996, pp. 80-84.

[Mac98] **Mackay W.E.,** *"Augmented Reality: Linking real and virtual worlds - A new paradigm for interacting with computers"*, In Proceedings of AVI'98, ACM Conference on Advanced Visual Interfaces, l'Aquila, Italy, May 1998. New York: ACM Press, 1998. Available from Internet: http://www-ihm.lri.fr/~mackay/psfiles/AVI98.AugmentedReality.ps

[MK94] **Milgram P., Kishino F.,** "*A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays"*, Transactions on Information Systems, E77-D (12), 1994, pp. 1321-1329.

[NC97] **Nigay L., et Coutaz J.,** "*Software architecture modelling: Bridging Two Worlds using Ergonomics and Software Properties"*. Livre, Formal Methods in Human-Computer Interaction (Palanque et Paterno éditeurs), 1997, p. 49-73, Springer Verlag.

[Nig94] **Nigay L.,** « *Conception et modélisation logicielles des systèmes interactifs application aux interfaces multimodales* », Thèse de doctorat en informatique, Grenoble, 1994.

[Nig01] **Nigay L.,** *« Thèse d'habilitation à diriger des recherches en informatique »,* Université Joseph Fourier, Grenoble, France, Décembre 2001.

[NKG04] **Nielsen M., Kramp G., Grønbæk K.,** "*Mobile Augmented Reality Support for Architects Based on Feature Tracking Techniques"*, International Conference on Computational Science, 2004, pp. 921-928

[NMK96] **Noma H., Miyasato T., Kishino F.,** *"A palmtop display for dextrous manipulation with haptic sensation"*, Acte de la conférence Human factors in computing systems, 1996, pp. 126-133.

[NSM+02] **Nigay L., Salembier P., Marchand T., Renevier P., Pasqualetti L.,** *"Mobile and Collaborative Augmented Reality: A Scenario Based Design Approach"*, In Paternò F. (Ed.) Proceedings of Mobile HCI 2002, LNCS 2411, 2002, Springer-Verlag, pp. 241-255.

[MR84] **McDermid J., Ripkin K.,** "*Life Cycle Support in the ADA environment*", Cambridge University Press, 1984, 259 pages.

[Nor86] **Norman D.A.,** *"Cognitive Engineering",* In Norman D.A., Draper S. W. (Eds), User Centered System Design. New Perpectives on Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, 1986, chapter 3, pp. 31-61.

[OPM+03] **O'Neill K., de Paor A., MacLachlan M., McDarby G.**, *"An Investigation into the performance of a Virtual Mirror Box for the treatment of Phatom Limb Pain in Amputees using Augmented Reality Technology",* In Stephanidis C. (Eds), Universal Access in HCI, Inclusive Design in the Information Society, Proc. of HCI International, 22-27 June 2003, Crete, Greece, London : Lawrence Erlbaum Associates, 2003, vol. 4, pp. 236-240.

[OSY+99] **Ohshima T., Satoh K., Yamamoto H., Tamura H.,** *"RV- Border Guards: A Multiple-Player in Mixed Reality space"*, In proceedings of the 2nd International workshop on Augmented Reality, San Francisco, 1998.

[Oua94] **Ouadou K.**, « *AMF: un modèle d'architecture multi-agents multi-facettes pour Interfaces Homme-Machine et les outils associés* ». Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1994.

[PMF 04] **Penn, A., Mottram, C., Fatah gen. Schieck, A., Wittkämper, M., Störring, M., Romell, O., Strothmann, A., & Aish, F.,** *"Augmented reality meeting table: a novel multi-user interface for architectural design"., In: van Leeuwen, J.P. and Timmermans, H.J.P. (Eds).* 7th International Conference on Design & Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning 2004. *Kluwer Academic Publishers, Eindhoven, pp. 213-220, 2004.*

[RB03] **Rabardel P., Bourmaud G.,** *"From Computer to instrument system: a developmental perspective"*. In Interacting with Computers, Elsevier, vol. 15, 2003, pp. 665-691.

[Ren04] **Renevier P.,** « *Systèmes Mixtes Collaboratifs sur Supports Mobiles: Conception et Réalisation* », Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 28 juin 2004. 220 pages.

[RN95] **Rekimoto J., Nagao K.,** *"The World through the Computer: Computer Augmented Interaction with Real World Environments"*, Acte du symposium UIST'95, (1995).

[RN01] **Renevier P., Nigay L.,** *"Mobile Collaborative Augmented Reality: the Augmented Stroll"*, In Proceedings of EHCI'01, IFIP WG2.7 (13.2) Conference, Toronto, May 2001, LNCS 2254, Spinger-Verlag, pp. 315-334. Available from Internet: http://iihm.imag.fr/publs/2001/ehci01-renevier.pdf

[RNB+04] **Renevier P., Nigay L., Bouchet J., Pasqualetti L.**, « *Generic interaction techniques for mobile collaborative mixed systems* ». In R. Jacob et al. (eds), Computer-Aided Design of User Interfaces IV, Proceedings of CADUI'2004, Funchal, Madeira, Portugal, Jan 13-16, 2004, Kluwer, ISBN 1-4020-3145-9, pp. 309-322. Publié aussi in Proc. of the Workshop MIXER'04, Funchal, Madeira, January 13, 2004, CEUR Workshop Proceedings, ISSN 1613- 0073, online: CEUR-WS.org/Vol-91/paperD2.pdf.

[Rob87] **Robert P.**, *"Petit Robert. Dictionnaire de langage Française"*, ISBN 2-85036-066-X, 1987.

[Roy70] **Royce W.,** *"Managing the development of large software systems",* Actes de la conférence IEEE Western Electronic Show Convention (WESTCON), 1970, p. 1-9.

[RR01] **Robinson J. A., Robertson C.**, *"The LivePaper system: augmenting paper on an enhanced tabletop",* In Computer & Graphics, vol. 25, n. 5, October 2001, pp. 731-743, Elsevier.

[RRT+96] **Rau G., Radermacher K., Thull B., Pichler,C.,** "*Aspects of an Ergonomic System Design of a Medical Worksystem"*, in: Taylor,R., Lavallée,

St., Burdea, G., Moesges, R.(eds.): Computer Integrated Surgery, MIT-Press, Cambridge, MA, 1996, pp. 203-221.

[RSK+98] **Reiners D., Stricker D., Klinker G., et Muller S.,** *"Augmented reality for contruction task : door lock assembly"*, Proceedings 1st International Workshop on Augmented Reality (IWAR'98), 1998, pp. 31–46, San Francisco.

[RW03] **Rabardel P., Waern Y.,** *"Editorial. From artefact to instrument",* In Interacting with Computers, Elsevier, vol. 15, 2003, pp. 641-645.

[Sch01] **Schwald B., and all**. *"STARMATE: Using Augmented Reality technology for computer guided maintenance of complex mechanical elements",* e2001 Conference, Venice-Italy 17-19, October 2001.

[SCT+94] **State A., Chen D T., Tector C., Brandt A., Chen H., Ohbuchi R., Bajura M., Fuchs H.,** *"Case Study: Observing a Volume Rendered Fetus within a Pregnant Patient",* Proceedings of IEEE Visualization '94 Washington D.C., 17-21 October 1994, pp 364-368.

[SEG98] **Szalavari Z., Eckstein E., Gervantz M.,** "*Collaborative Gaming in augmented Reality"*, Proceedings of the Symposium on Virtual Reality Software and Technology, 1998, pp. 195-204.

[SH02] **Shelton B., et Hedley N.,** *"Using augmented reality for teaching earth-sun relationships to undergraduate geography students".* IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop. Darmstadt, Germany, Sept 2002.

[SKV 02] **Sauer F., Khamene A., Vogt S.,** *"An augmented reality navigation system with a single-camera tracker: System design and needle biopsy phantom trial".* In: Proceedings of the Second International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), 2002.

[SL03] **Schwald B., de Laval B.,** "*An augmented reality system for training and assistance to maintenance in the industrial context"*, journal of WSCG, vol 11 N°1 ISSN 1213-6972 WSCG'2003 Février 3-7, 2003, Plzem, Czech republic.

[SLH+96] **State A., Livingston M A., Hirota G., Garrett W F., Whitton M C., Fuchs H., Pisano E D.,** *"Techniques for Augmented-Reality Systems: Realizing Ultrasound-Guided Needle Biopsies"*, Proceedings of SIGGRAPH'96 (New Orleans, LA, 4-9 August 1996), pp.439-446.

[SL00] **Sato K., Lim Y.-K.**, *"Physical Interaction and Multi-Aspect Representation for Information Intensive Environments",* In Proceedings of IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, September 27-29, 2000, Osaka, Japan, pp. 436-443.

[SS01] **Stedmon A.W., & Stone *R.*,** *"Re-viewing reality: human factors issues in synthetic training environments"*, International Journal of Human Computer Studies, vol.55, 2001, pp.675–698.

[Sti96] **Stifelman L. J.,** *"Augmenting Real-World Objects: A paper-based Audio Notebook".* In Proceedings of Conference companion on Human factors in computing systems, Vancouver, Canada, April 13-18, 1996, ACM Press, ISBN: 0-89791-832-0, pp. 199-200.

[SPM+02] **Streitz N. A., Prante Th.,. M¨uller-Tomfelde C., Tandler P., and Magerkurth C.,** *"Roomware : The second generation"*, In International Conference on Ubiquitous Computing (UBICOMP), 2002, pp.77–78, Goteborg, Sweden.

[Tar97] **Tarpin-Bernard F.,** *« Travail coopératif synchrone assisté par ordinateur : Approche AMF-C »*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, juillet 1997, n° 97-14, 158 pages.

[Tar99] **Tarpin-Bernard F., David B. T.**, *« AMF: un modèle d'architecture multiagents multi-facettes »,* In Technique et Science Informatiques, Hermès, Paris, vol. 18, N° 5, mai 1999, pp. 555-586.

[Urb95] **Urban E.C.,** "*the Information Warrior*", *IEEE Spectrum 32*, vol 11, 1995, pp.66-70.

[Vac92] **Vacherand-Revel J.**, « Interaction cognitive et interface graphique. Le cas de la conception / réalisation de logiciels multimédias de formation », Thèse de doctorat, Université Lumière - Lyon 2, 17 septembre 1992, 403 pages.

[WA97] **Webster A., & al.,** *"A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Reality Systems for Exploring the Urban Environment"*, Acte de la conference ISWC'97, Cambridge, 1997, pp. 74-81.

[Wel91] **Wellner P.,** *"The digitaldesk calculator: tangible manipulation on a desk top display"*, In Symposium on User interface software and technology, pp.27–33, Hilton Head, USA, 1991. ACM Press.

[Wel93] **Wellner P.,** "*Interacting with Paper on the DigitalDesk"*, In Communications of the ACM, vol. 36, n° 7, July 1993, pp 86-96. Available from Internet: ftp://ftp.parc.xerox.com/pub/europarc/reports/ddesk-cacm93.ps.

[WFL+96] **Webster A., Feiner S., MacIntyre B., Massie W., Krueger T.,** *"Augmented Reality in Architectural Construction, Inspection, and Renovation",* présenté au congrès ASCE Computers in Civil Engineering, 1996, pp.913-919.

[WFM+96] **Webster A., Feiner S., MacIntyre B., Massie W., Krueger. T,** *"Augmented reality in architectural construction, inspection and renovation"*, In Proceedings of the Third Congress on Computing in Civil Engineering (ASCE), Anaheim, USA, June 17-19, 1996, pp. 913-919. Available from Internet: http://www.cs.columbia.edu/graphics/publications/asce.pdf

[WMG93] **Wellner P., Mackay W., Gold R.**, *"Computer Augmented Environments: Back to the Real World",* Special Issue of Communications of the ACM, vol. 36, n° 7, July 1993, pp 24-26.

[WOS+03] **Wiedenmaier S., Oehme O., Schmidt L., & Luczak H.,** ***"****Augmented reality for assembly processes - design and experimental evaluation",* International Journal of Human-Computer Interaction, vol.16, 2003, pp. 497-514.

[WPS05] **Wagner D., Pintaric T., Ledermann F., Schmalstieg D.,** ***"****Towards Massively Multi-User Augmented Reality non Handheld Devices",* Proceedings of the Third International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005), Munich, Germany.

[WOS+03] **Wiedenmaier S., Oehme O., Schmidt L., & Luczak H.,** ***"****Augmented reality for assembly processes - design and experimental evaluation",* International Journal of Human-Computer Interaction, vol.16, 2003, p. 497-514.

[ZAK05] **Zingale, C., Ahlstrom, V., & Kudrick, B.,** "*Human factors guidance for the use of handheld, portable, and wearable computing devices",* Atlantic City International Airport, NJ: Federal Aviation Administration William J. Hughes Technical Center, 2005.

[ZAZ05] **N.Zenati N.Zerhouni, K.Achour.** "*Etude des apports d'un système de réalité augmentée au processus d'aide à la maintenance",* Performances et nouvelles technologies en maintenance, **PENTOM05,** Marrakech (Maroc), du 18 au 20 avril 2005, pp. 281-287**.**

[ZZA05] **N.Zenati, N.Zerhouni, K.Achour**, "*Principe de Conception d'un Système d'Aide à la Maintenance Basé sur la Réalité Augmentée",* Conférence Internationale sur la Productique, **CIP'2005**, Tlemcen, Algérie, 03-05 décembre 2005, page(s): 345-351.

[ZZA06a] **N.Zenati, N.Zerhouni, K.Achour**, "*Espace de conception d'un système d'aide à la maintenance basé sur la réalité augmentée",* 6ème Conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation -**MOSIM'06** - du 3 au 5 avril 2006 – Rabat – Maroc, « Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités » pp.1281-1286.

[ZZA06b] **N.Zenati, N.Zerhouni, K.achour,** "*Design Area for Assistance to Maintenance based on Augmented Reality", Æ*EE International Conference on Industrial Technology **(ICIT2006)** Mumbai, India, 15-17 Décembre 2006, pp. 2960 – 2965.

[ZZ07] **N.Zenati, N.Zerhouni**, "*Augmented reality as a design tool for maintenance applications"*, International Review on Computer And Software (IRECOS), ISSN 1828-6003, Vol.2 N.2 March 2007, pp.149-158.

Bibliographie

ANNEXES

Annexe A: la base de données sous Oracle

Le présent tableau illustre les différentes tables de la base de données contenue dans le NF SGBD implémentées sous Oracle :

TABLES	**ATTRIBUT**	**SIGNIFICATION**	**TYPE**
Modèle machine	Code_Mod_Mach	Code	Number
	Nom_Modèle	Nom	Varchar2
Machine	Code_Machine	Code	Number
	Code_Vue_Etr	Code de la vue machine associée à cette machine	Number
	Nom_Machine	Nom	Varchar2
	Fabriquant	Fabriquant	Varchar2
	Pays_fabrication	Pays de fabrication	Varchar2
	Date_fabrication	Date de fabrication	Date
	Date_Acquisition	Date d'acquisition	Date
	Date_Mise_Marche	Date de mise en marche	Date
	Description	Description	Varchar2
	Code_Model_Etr	Code du modèle machine associé à cette machine	Number
Outil	Code_Outil	Code	Number
	Type_Outil	Type	Varchar2
	Marque_Outil	Marque	Varchar2
	Reference_Outil	Référence	Nvarchar2
	Date_Acquisition	Date d'acquisition	Date

	Date_Sortie	Date de sortie	Date
Technicien	Code_Techn	Code	Number
	Nom_Techn	Nom	Varchar2
	Prenom_Techn	Prénom	Varchar2
	Date_Naissance_Techn	Date naissance	Date
	Qualification	Qualification	Varchar2
	Niveau_Techn	Niveau	Varchar2
Adaptateur d'entrée **Ain**	Code_Ain	Code	Number
	Type_Ain	Type	Varchar2
	Marque_Ain	Marque	Varchar2
	Reference_Ain	Reference	Varchar2
	Desription_Ain	Descrption de Ain	Varchar2
Adaptateur de sortie **Aout**	Code_Aout	Code	Number
	Type_Aout	Type	Varchar2
	Marque_Aout	Marque	Varchar2
	Reference_Aout	Reference	Varchar2
	Description_Aout	Description	Varchar2
Scénario	Code_scenario	Code	Number
	Nom_scenario	Nom	Varchar2
	Type_Scénario	Type	Varchar2
	Date_Acquisition	Data	Date
	Code_Panne_Etr	Code de la panne associée à cette panne	Number
Construire-Scénario	Code_scenario_Etr	Code scénario à construire	Number
	Code_augm_Etr	Code de l'augmentation	Number
	Rang	Rang de l'augmentation dans le scénario	Number
	Code_vue_Etr	La vue machine à charger après la perception de l'augmentation	Float
	Coord_X	Coordonnées X de l'augmentation	Float
	Coord_Y	Coordonnées Y de l'augmentation	Float
	Coord_Z	Coordonnées Z de l'augmentation	Float
	Orient_Pitch	Angle d'orientation (axe X)	Float

	Orient_Turn	Angle d'orientation (axe Y)	Float
	Orient_Roll	Angle d'orientation (axe Z)	Float
Augmentation	Code_Augm	Code	Number
	Nom_Augm	Nom de fichier de l'augmentation	Varchar2
	Contenu_Image	Contenu du fichier image dans le cadre d'une augmentation de type image	
	Contenu_Video	Contenu du fichier vidéo dans le cadre d'une augmentation de type vidéo	
	Contenu_Son	Contenu du fichier son dans le cadre d'une augmentation de type son	
Type_Panne	Code_Panne	Code	Number
	Catégorie_Panne	Catégorie de la panne	Varchar2
	Nom_Panne	Nom	Varchar2
	Niveau_Panne	Niveau maintenance associé à la panne	Number
	Description_Panne	Description de la panne	Varchar2
	Code_Model_Etr	Code du modèle machine associé à ce type de panne	Number
Panne	Num_Panne	Numéro de panne	Number
	Code_Machine_Panne	Code machine associée à cette panne	Number
	Code_panne_Etr	Code panne associé à cette panne	Number
	Date_Panne	Date de la panne	Date
	Réparée	Indique si la panne est réparée	Number
	Date_réparation	Date de réparation	Date
Panne-Ain	Num_panne_Etr	Numéro de panne	Number
	Code_Ain_Etr	Code Ain	Number
	Date_Util	Date d'utilisation	Date
Panne-Aout	Num_panne_Etr	Numéro de panne	Number
	Code_Aout_Etr	Code Aout	Number

	Date_Util	Date d'utilisation	Date
Panne-outil	Num_panne_Etr	Numéro de panne	Number
	Code_outil_Etr	Code outil	Number
	Date_util	Date d'utilisation	Date
Panne-scénario	Num_panne_Etr	Numéro de panne	Number
	Code_scénarion_Etr	Code scénario	Number
	Date_Utilisation	Date d'utilisation	Date
Panne-Techn	Num_panne_Etr	Numéro de panne	Number
	Code_Techn_Etr	Code Technicien	Number
	Date_Intervention	Date d'intervention	Date
	Nbre_Tentative	Nbre de tentatives accordées par le superviseur au technicien	Number
	Validation_Travail	Indique si le travail est validé	Number
	Expire	Ordre de réparation expiré	Number
	Rang	Le rang d'intervention du technicien pour cette panne	Number
Temps-Minimum-Déroulement	Code_techn_Etr	Code technicien	
	Code_scénario_Etr	Code Scénario	
	Code _augm_Etr	Code Augmentation	
	Rang	Rang	
	Date_Réalisation	Date de réalisation	
	Temps_Min_Augm	Temps minimum pour la réalisation de la tâche correspondant à l'augmentation	
	Temps_Min_Scenario	Temps minimum pour la réalisation du scénario	

Annexe B: Procédure de maintenance Tour CNC

Intitulé : *Elimination d'un message de défaut.*

Anomalie : *Impossibilité de dialoguer avec la machine.*

Message : *''Global reprom program execution''*

Scénario *:*

A1.Mettre la machine hors tension et ouvrir la porte se trouvant à l'arrière de la machine

A2.Rechercher la carte électronique dénommée "Mem" dans la partie réservée au bloc "Commande Numérique"

A3.Tirer vers vous la carte

A4.Vérifier visuellement l'état de la carte pour détecter d'éventuelles anomalies.

A5.Si aucune anomalie visuelle n'est constatée enlever la pile au lithium se trouvant sur la carte.

A6.Attendre 20mn le temps nécessaire au condensateur de sécurité de se décharger, ainsi que les" eproms".

A7.Remettre la pile à sa place.

A8.Placer la carte électronique dans son emplacement, en veillant à ce qu'elle soit bien connectée à la carte mère.

A9.Refermer les deux portes donnant accès à la zone de maintenance.

A10. Remettre la machine sous tension par le biais du sectionneur

A11. Attendre le chargement des programmes nécessaire au fonctionnement de la machine.

A12. Vérifier sur l'écran qu'aucun message d'erreur n'est signalé.

A13. Si ce n'est pas le cas et que le message "Global reprom program execution", s'affiche encore une fois, procéder comme suit :

A14. Reprendre les actions de *A1* à *A3* qui vous permettrons d'enlever la carte "Mem".

A15. Remplacer les eproms existants qui sont au nombre de 7 en veillant au respect de la position de chacun.

A16. Reprendre les actions de *A8* à *A17*.

A17. Reprendre les actions de *A1* à *A4*, qui vous permettront cette fois d'enlever la carte électronique" Proc Machine".

A18. Si aucune anomalie visuelle n'est constatée, procéder comme suit :

A19. Remplacer la carte enlevée par une autre neuve ayant les mêmes caractéristiques et vérifier que celle-ci est bien connectée à la carte mère.

A20. Reprendre les actions de *A10* à *A18*.

A21. Reprendre les actions de *A1* à *A3* qui vous permettrons d'enlever la carte électronique "Proc Graphique".

A22. Reprendre les actions de *A23* à *A26.*

A23. Reprendre les actions de *A10* à *A17*

A24. Si le message "Global reprom program execution" n'apparaît plus, lire le nouveau message s'il existe un, sinon la machine affichera le menu principal qui vous permettra son exploitation normale.

A25. Si non, contacter un expert.

Annexe C : Implémentation des agents PAC en C++Builder

Nous allons dans ce présent annexe donner d'abord l'implémentation sous C++Builder de la classe BAL, qui est la classe clé permettant la communication entre agents PAC puis donner l'implémentation d'un agent sous C++Builder, tous les agents étant codés de la même manière nous nous restreindrons à donner l'implémentation de l'agent ciment.

1. La classe BAL

La classe BAL est dérivée d'une classe abstraite qui va servir de base pour les types de messages. Celle-ci est nommée "Générique". Donnons d'abord l'implémentation de cette dernière :

```
#ifndef _GENERIQ_
#define _GENERIQ_
using namespace std;
class GENERIQUE
{
public :
virtual ~GENERIQUE();
virtual GENERIQUE* clone()=0;
virtual int recup_codetr()=0;
};
GENERIQUE::~GENERIQUE()
{
}
#endif
```

Donnons à présent l'implémentation de BAL :

```
#ifndef _BAL_
#define _BAL_
#include "Class_Generique.h"
class BAL : public GENERIQUE
{
public :
BAL();
virtual ~BAL();
GENERIQUE* BAL::tete() const;
virtual GENERIQUE* clone();
```

```
virtual int recup_codetr();
void send(GENERIQUE*);
void receive (GENERIQUE*&);
private :
class Noeud;
Noeud* premier;
Noeud* dernier;
HANDLE mutex;
int cpt;
HANDLE sig;
void detruire_bal();
//definir la classe Noeud
private :
class Noeud : public GENERIQUE
{
public :
Noeud(GENERIQUE* g=0, Noeud* n=0);
virtual ~Noeud();
virtual GENERIQUE* clone();
virtual int recup_codetr();
GENERIQUE* valeur;
Noeud* suivant;
};
};
// definition des methodes de Noeud
BAL::Noeud::Noeud(GENERIQUE* g,Noeud* n): valeur(g->clone()),suivant(n)
{
}
BAL::Noeud::~Noeud()
{
delete valeur;
}
GENERIQUE* BAL::Noeud::clone()
{
return (new Noeud (*this));
}
int BAL::Noeud::recup_codetr()
{
return (-1);
}
// definition des methodes de BAL
BAL::BAL() : premier(0) , dernier(0)
{
AnsiString ch;
int n = 0;
do
```

```
{
ch = "SEMPH";
n++;
ch = ch + AnsiString (n);
mutex = CreateSemaphore (NULL, 1, 1, ch.c_str());
}
while (GetLastError() == ERROR_ALREADY_EXISTS);
cpt = 0;
ch = "signaler";
ch = ch + AnsiString (n);
sig = CreateEvent(NULL,false, false,ch.c_str() );
n++;
}
BAL::~BAL()
{
detruire_bal();
}
GENERIQUE* BAL::tete()const
{
return(premier->valeur);
}
GENERIQUE* BAL::clone()
{
return (new BAL (*this));
}
int BAL::recup_codetr()
{
return (-1);
}
void BAL::detruire_bal()
{
Noeud* tmp = premier;
while (tmp != 0)
{
premier = tmp->suivant;
delete tmp;
tmp = premier;
}
}
void BAL::send(GENERIQUE* g)
{
WaitForSingleObject ( mutex , -1 );
if ( g!= 0)
{
Noeud* n;
n = new Noeud( g ,0);
```

```
if (dernier != 0)
{
dernier->suivant = n;
dernier = n;
}
else
{
premier = n;
dernier = n;
}
cpt++;
SetEvent(sig);
ReleaseSemaphore (mutex,1,NULL);
}
else
{
ReleaseSemaphore (mutex,1,NULL);
}
}
void BAL::receive(GENERIQUE*& g)
{
WaitForSingleObject ( mutex , -1 );
if (cpt == 0)
{
ReleaseSemaphore (mutex,1,NULL);
WaitForSingleObject (sig,-1);
WaitForSingleObject ( mutex , -1 );
cpt--;
if (cpt>0)
{
SetEvent(sig);
}
}
else
{WaitForSingleObject (sig,-1);
cpt--;
if(cpt>0)
SetEvent(sig);
}
if (premier != 0)
{
g = ( *(premier->valeur) ).clone();
Noeud* tmp;
tmp = premier;
premier = premier->suivant;
if (premier == 0)
```

```
{
dernier = 0;
}
delete tmp;
ReleaseSemaphore (mutex,1,NULL);
}
else
{
g = 0;
ReleaseSemaphore (mutex,1,NULL);
}
}
#endif
```

Un type de message contenu dans un objet instancié de la classe BAL sera dérivé de « Generique ».

2. Agent ciment: Classe AGENT_CIMENT

La classe AGENT_CIMENT est dérivée de la classe abstraite AGENT :

```
#ifndef _AGENT_
#define _AGENT_
#include<vector.h>
#include "Class_Bal.h"
class AGENT
{
public :
BAL Boitep;
BAL Boitea;
BAL Boitec;
vector <AGENT *> hier;
virtual int bidon()=0;
};
#endif
```

La classe AGENT_CIMENT est implémentée comme suit :

```
//agent ciment;
#ifndef _AGENT_CIMENT_
#define _AGENT_CIMENT_
#include "Class_Abs_Agent.h"
#include "Th_P_Agent_Ciment.h"
#include "Th_A_Agent_Ciment.h"
#include "Th_C_Agent_Ciment.h"
class AGENT_CIMENT : public AGENT
{
public :
AGENT_CIMENT();
```

```
~AGENT_CIMENT();
virtual int bidon();
public :
TH_P_AGENT_CIMENT *Th_p;
TH_A_AGENT_CIMENT *Th_a;
TH_C_AGENT_CIMENT *Th_c;
};
AGENT_CIMENT::AGENT_CIMENT()
{
Th_p = new TH_P_AGENT_CIMENT (true);
Th_p->agp = this;
Th_p->Resume();
Th_a = new TH_A_AGENT_CIMENT (true);
Th_a->aga = this;
Th_a->Resume();
Th_c = new TH_C_AGENT_CIMENT (true);
Th_c->agc = this;
Th_c->Resume();
}
AGENT_CIMENT::~AGENT_CIMENT()
{
Th_p->Terminate();
Th_a->Terminate();
Th_c->Terminate();
Boitep.~BAL();
Boitea.~BAL();
Boitec.~BAL();
}
int AGENT_CIMENT::bidon()
{
return (-10);
}
#endif
```

Contribution à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée pour la maintenance

Nos travaux présentés dans cette thèse s'inscrivent dans le cadre de l'Interaction Homme-Machine (IHM) et contribuent à la conception et à la réalisation d'un système de réalité augmentée (RA) dans le cadre précis de la maintenance. Dans cet axe de recherche de l'IHM, les avancées sont importants et se manifestent par de nombreux systèmes présents dans des domaines aussi diverses que la médecine, la maintenance, la robotique…
Dans ce contexte, nous avons proposé une démarche de conception ergonomique pour les systèmes de RA. Dans cet axe, nous avons présenté les propriétés ergonomiques.

Afin de caractériser plus finement la dualité de l'interaction (Utilisateur-Monde Réel et Utilisateur-Monde Virtuel), nous avons défini la notation UML.
Poursuivant le cycle de vie d'un système interactif issu du génie logiciel, nous avons abordé l'étape de la conception logicielle du système de RA. Nous avons défini une solution générique de réalisation logicielle selon le modèle d'architecture logicielle PAC-Amodeus. Ce modèle adapté souligne la dualité de l'interaction avec deux branches indépendantes dédiées à l'interaction avec le monde réel et le monde informatique.

En collaboration avec le technicien, nous avons appliqué et testé nos résultats méthodologiques sur une application en maintenance. Cette application, ARIMA, permet de guider les techniciens en leur procurant des informations sous forme d'augmentations multimédia afin d'accroître leur efficacité dans des activités de maintenance.

Mots-clés : *Interaction Homme-Machine, Réalité Augmentée, maintenance, Modèle d'interaction, méthode de conception et de réalisation logicielle.*

Contribution to the design and implementation of augmented reality system for maintenance application

Our work presented in this thesis is part of Human Computer Interaction (HCI) and consists of designing and implementing an augmented reality system (AR) in maintenance context. In this research of Human computer Interaction (HCI), advances are important and are present in many domains such as medicine, maintenance, robotics…
In this context, we have proposed an ergonomic concept of Augmented Reality systems. therefore, we have presented an ergonomic properties.

In order to gain an understanding of the duality of interaction, (users interacting with part of the real world and simultaneously with part of the virtual world), we have defined an UML notation.
Continuing the life cycle of interactive system from software engineering, we have discussed the software design step of the Augmented Reality system. We have defined the generic solution of software realization according to the hybrid PAC-Amodeus software architecture model for AR systems. This adapted model underscores the duality of interaction with two independent branches dedicated to the interaction with the real world and the virtual world.

In collaboration with the technician, we have applied and tested our methodological results on a maintenance application, ARIMA. It provides the technician with on-screen guidance information in form of multimedia augmentation while performing a maintenance application.

Keywords: *Human-Computer Interaction, Augmented Reality, maintenance, model of interaction, design and software implementation* method.