Habilitation à Diriger des Recherches

Présentée devant

l'Université de RENNES I
UFR "Faculté de Médecine"
Spécialité : Informatique Médicale / Biostatistiques

par

Bernard GIBAUD

Interopérabilité syntaxique et sémantique pour l'échange de données et de connaissances en imagerie médicale

soutenue le 25 octobre 2000

devant le jury composé de

MM.	Jean-Marie Scarabin	Président
	Régis Beuscart	Rapporteur
	Philippe Cinquin	Rapporteur
	Robert Di Paola	Rapporteur
	Pierre Le Beux	Examinateur

Remerciements

Je tiens à exprimer ici ma profonde gratitude :

à Jean-Marie Scarabin, pour son rôle d'inspirateur de mes travaux et son soutien indéfectible, ainsi que pour l'honneur qu'il me fait en présidant ce jury,

à Robert Di Paola, pour sa patience et sa confiance sans limites,

à Régis Beuscart et Philippe Cinquin, pour l'amitié et l'honneur qu'ils m'ont faits en acceptant d'être rapporteurs de mes travaux,

enfin à Pierre Le Beux, pour son appui scientifique et son amitié.

Mes remerciements s'adressent également à toutes les personnes – scientifiques, médecins, collaborateurs extérieurs - côtoyées au sein du Laboratoire SIM depuis de nombreuses années, et qui m'ont aidé à concevoir ou à réaliser mes projets, avec une mention toute particulière pour Christian Barillot - maintenant chercheur à l'IRISA - mais complice de tant d'actions de recherche passionnantes et fructueuses.

Une autre mention spéciale à Pierre Jannin et Christophe Grova pour leurs contributions notables à la réorganisation du laboratoire menée depuis deux ans et leur confiance dans l'avenir.

Enfin, mes remerciements s'adressent à tous les étudiants – thésards, DEA ou élèves ingénieurs auxquels j'ai tenté de faire partager mon enthousiasme et qui par leur travail ont contribué à « fouiller » notre terrain de recherche et l'enrichir sans cesse.

Résumé

Cette synthèse concerne le problème de l'échange de données médicales multimédia, et analyse sur un plan technique les conditions à remplir pour obtenir une interopérabilité entre les composants de systèmes d'information hospitaliers (SIH) distribués et hétérogènes. Le problème est étudié dans deux cadres applicatifs différents et complémentaires.

Le premier est celui des systèmes de communication et d'archivage d'images à l'hôpital (PACS). La problématique de la gestion des images est étudiée selon une approche systémique, et qui est contributive aux progrès de la standardisation. La place des technologies de l'internet est analysée et placée dans une perspective plus large d'intégration des SIH.

Le second cadre applicatif étudié est celui de l'aide à la préparation de gestes chirurgicaux en neurochirurgie. La problématique posée est celle de la représentation de connaissances dans le domaine de l'imagerie cérébrale. Les problèmes d'interopérabilité sémantique constituent là un point de passage obligé pour permettre une articulation correcte entre connaissances générales du domaine et connaissances instanciées et pour le partage et la ré-utilisation des connaissances dans différents contextes : aide à la décision, recherche, enseignement.

Ces deux cadres applicatifs - focalisés respectivement sur la gestion des données et la gestion des connaissances - apparaissent comme également importants et complémentaires. En effet la clé de succès des systèmes d'aide à la décision de demain sera notamment leur bonne insertion dans l'environnement clinique quotidien des médecins, pour exploiter de façon aussi complète que possible les informations cliniques disponibles sur le patient. Enfin le partage de données cliniques recueillies au niveau de différents centres sera également un point de passage obligé pour mener une recherche clinique à grande échelle, ce qui au plan technologique est aujourd'hui possible grâce au web.

Mots Clés

Imagerie Médicale, Systèmes d'Information Hospitaliers, Systèmes de Communication et d'Archivage d'Images, PACS, Standards, Intégration, Aide à la décision, Atlas

FABLE IX.

Le Laboureur & ses Enfants.

TRavaillez, prenez de la peine;
C'eſt le fonds qui manque le moins.

Un riche Laboureur ſentant ſa mort prochaine,
Fit venir ſes enfants, leur parla ſans témoins.
Gardez-vous, leur dit-il, de vendre l'héritage
Que nous ont laiſſé nos parents,
Un tréſor eſt caché dedans.
Je ne ſais pas l'endroit; mais un peu de courage
Vous le fera trouver, vous en viendrez à bout.
Remuez votre champ dès qu'on aura fait l'août.
Creuſez, fouillez, bêchez, ne laiſſez nulle place
Où la main ne paſſe & repaſſe.
Le pere mort, les fils vous retournent le champ
Deçà, delà, par-tout, ſi bien qu'au bout de
Il en rapporta davantage.

D'argent, point de caché. Mais le pere fut ſage
De leur montrer avant ſa mort
Que le travail eſt un tréſor.

DE M. DE LA FONTAINE

TABLE DES MATIERES

1. Introduction - Thématique de recherche ***10***

2. Interopérabilité entre les équipements d'imagerie au sein de systèmes d'information intégrés ***12***

2.1. Problématique et état de l'art **13**
2.1.1. Les PACS et la gestion des images 13
2.1.1.1. Motivations 13
2.1.1.2. Analyse de l'échec des expériences pionnières (82-90) 14
2.1.1.3. La gestion des images 15
2.1.2. La problématique de l'intégration 17
2.1.2.1. L'intégration : contexte et domaine de l'étude 17
2.1.2.2. Définitions 18
2.1.2.3. Principaux aspects de l'intégration et valeur ajoutée 18
2.1.2.4. Conception d'un système intégré : l'approche rationnelle 20
2.1.2.5. Les solutions pragmatiques pour l'intégration 23
2.1.2.6. Comparaison et synthèse 28

2.2. Contributions au domaine **30**
2.2.1. Le projet SIRENE 30
2.2.1.1. Motivations, objectifs et méthodes 30
2.2.1.2. Résultats 32
2.2.1.3. Conclusion de la première phase du projet SIRENE (1983-1989) 33
2.2.1.4. Poursuite du projet SIRENE (1990-1996) 34
2.2.2 La modélisation des systèmes de gestion d'images - le modèle MIMOSA 35
2.2.2.1. Contexte 35
2.2.2.2. Approche méthodologique 35
2.2.2.3. Résultats 36
2.2.3 Utilisation du modèle MIMOSA pour la standardisation 41
2.2.3.1. Contexte 41
2.2.3.2. Approche méthodologique 41
2.2.3.3. Résultats 42

2.3. Perspectives **45**
2.3.1. Interopérabilité 47
2.3.1.1. Structure des données médicales multimédia 47
2.3.1.2. Elaboration de modèles de référence de domaine 48
2.3.1.3. Elaboration de standards 49
2.3.2. Intégration de systèmes 50
2.3.3. Qualité de service dans les systèmes d'imagerie 51

2.4. Références **53**

3. Représentation et gestion de connaissances numériques et symboliques associées aux images pour l'aide à la décision ***59***

3.1. Problématique et état de l'art **60**
3.1.1. Contexte 60
3.1.2. Potentialités des atlas numériques 61
3.1.3. Etat de l'art 62

3.2. Contributions au domaine **63**
3.2.1. Travaux pionniers en représentation 3D des structures anatomiques 64
3.2.1.1. Représentation 3D du réseau vasculaire cérébral (1984-1985) 64
3.2.1.2 Représentation 3D des structures anatomiques cérébrales (1987) 65
3.2.2. Fusion multimodalité et accès à des atlas 65
3.2.3. Intégration de connaissances symboliques et problématique de navigation (1991-1996) 66
3.2.3.1. Contexte 66

3.2.3.2. Approche méthodologique 66
3.2.3.3. Résultats: organisation d'une base de connaissances et d'un système de navigation hypermédia 67
3.2.4. Base d'informations sujets et problème d'évolution de schéma 69
3.2.4.1. Contexte 69
3.2.4.2. Approche méthodologique 69
3.2.4.3. Résultats 70
3.2.5. Démarche générale de gestion des connaissances 70

3.3. Perspectives 74
3.3.1. Introduction : l'internet et la nouvelle donne pour la gestion et le partage des connaissances médicales 74
3.3.2. Représentation de données et de connaissances sur le cortex cérébral 76
3.3.3. Fédération de bases d'informations en neuro-imagerie 78

3.4. Références 81

4. Conclusion 86

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Services de base dans le cadre de l'architecture HISA *22*
Figure 2. Intégration "ad-hoc", fondée sur l'utilisation de composants d'interface *24*
Figure 3. Intégration fondée dur l'utilisation d'un "middleware applicatif" *26*
Figure 4. Intégration "légère" au niveau du poste de travail *27*
Figure 5. Architecture générale du PACS SIRENE *31*
Figure 6. Structure des fonctions MIMOSA supportant l'acquisition, le traitement et l'interprétation des images *37*
Figure 7. Architecture générale du démonstrateur MIMOSA *40*
Figure 8. Intégration fondée sur des plateformes homogènes d'accès et des agents de médiation *51*
Figure 9. Processus d'utilisation d'un atlas *61*
Figure 10. Le quadrillage proportionnel de Talairach : *62*
Figure 11. Stéréorestituteur analytique *64*
Figure 12. Couple stéréoscopique généré à partir d'un modèle 3D du réseau vasculaire cérébral (simulation de la ponction d'un kyste) *65*
Figure 13. Modèles 3D des structures anatomiques cérébrales *65*
Figure 14. Architecture d'un système de gestion de connaissances anatomiques cérébrales *67*
Figure 15. Processus de production et d'utilisation des connaissances au sein d'un atlas dans un cadre d'aide à la décision *71*
Figure 16. Cycle de production et d'utilisation des données et des connaissances médicales *75*
Figure 17. Premier mode de variation du sillon central gauche extrait d'une base d'apprentissage de 20 sujets *77*
Figure 18. Localisations en MEG d'activités somesthésiques au voisinage du sillon central gauche *77*
Figure 19. Etude de l'asymétrie droite-gauche des sillons dans la région antérieure du langage *78*
Figure 20. Fédération de bases d'informations distribuées à l'aide de services de médiation *79*

TABLE DES ABREVIATIONS

ACR : American College of Radiology
AIM : Advanced Informatics in Medicine
API : Application Program Interface
ATM : Asynchronous Transfer Mode
CEN : Comité Européen de Normalisation
CORBA : Common Object Request Broker Architecture
DICOM : Digital Imaging and Communications in Medicine
DTD : Document Type Definition
EEG : Electroencéphalographie
EHCRA : Electronic Healthcare Record Architecture
FTAM : File Transfer Access and Management
FTP : File Transfer Protocol
HIMSS : Healthcare Information and Management Systems Society
HISA : Healthcare Information System Architecture
HL7 : Health Leven Seven
HTML : Hypertext Markup Language
HTTP : Hypertext Transfer Protocol
IDL : Interface Definition Language
IETF : Internet Engineering Task Force
IHE : Integrating the Heathcare Enterprise
IRM : Imagerie par Résonance Magnétique
IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
ISO : International Standards Organisation
JPEG : Joint Photographic Expert Group
MEG : Magnétoencéphalographie
MPEG : Moving Picture Expert Group
MIME/ S-MIME : (secured) Multipurpose Internet Mail Extensions
MIMOSA : Medical Image Management in an Open System Architecture
NEMA : National Electrical Manufacturers Association
OMG : Object Management Group
OSI : Open Systems Interconnection
PACS : Picture Archiving and Communication Systems
QoS : Quality of Service
RDF : Resource Description Framework
RSNA : Radiological Society of North America
SCDA : Système de Contrôle des Droits d'Accès
SCSI : Small Computer System Interface

SEEG : Stereoelectroencéphalographie

SGA : Système de Gestion d'Actes

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

SGIM : Système de Gestion d'Images Médicales

SI : Système d'Information

SIH : Système d'Information Hospitalier

SIR : Système d'Information Radiologique

SIUS : Système d'information d'unité de soins

SMIL : Synchronised Multimedia Integration Language

SOP : Service Object Pair (cf DICOM)

TCP-IP : Transport Control Protocol - Internet Protocol

TEMP : Tomographie d'émission mono-photonique

TEP : Tomographie à émission de positons

UML : Unified Modelling Language

UMLS : Unified Medical Language System

VRML : Virtual Reality Markup Language

WfMC : Workflow Management Coalition

W3C : World Wide Web Consortium

XHTML : Extensible Hypertext Markup Language

XML : Extensible Markup Language

XSL : Extensible Style Language

1. Introduction - Thématique de recherche

Les signaux et les images médicales acquis dans le cadre d'explorations morphologiques et fonctionnelles sont de plus en plus disponibles sous forme numérique. Cette nature numérique facilite la communication, le stockage et l'accès à ces informations, ainsi que leur utilisation dans un contexte clinique ou pour l'élaboration de nouvelles connaissances. Par ailleurs l'utilisation des images conduit de plus en plus à les associer à des informations verbales, structurées ou non, au sein de documents multimédia.

Le recherche que je mène porte principalement sur la gestion et le partage de ces informations. Il s'agit de concevoir des *systèmes logiciels* pour *organiser* ces informations, *faire connaître* leur existence aux utilisateurs potentiels, et leur permettre d'y *accéder* et de les *utiliser* dans des conditions et sous une forme *appropriées*, qui dépendent du *contexte* d'utilisation. Ces systèmes logiciels intègrent le plus souvent des composants hétérogènes (c'est à dire conçus dans des environnements différents), ce qui pose le problème de leur interopérabilité au sein du système intégré. Ce problème d'interopérabilité est souvent étudié en distinguant les aspects syntaxiques (formats des données, mécanismes et protocoles d'échange) et les aspects sémantiques (entités conceptuelles échangées, architecture).

La gestion des signaux et des images médicales pose des problèmes particuliers, liés d'une part au caractère multidimensionnel de ces informations (conduisant à des volumes de données très importants et appelant donc des solutions adaptées) et d'autre part au fait que ces données n'ont en elles-mêmes aucune signification capable de servir à les gérer d'une façon efficace. Il s'agit donc de leur associer tout un ensemble de données (techniques, médicales) qui en précisent le sens, et sur la base desquelles une stratégie et des processus de gestion convenables peuvent être définis et mis en œuvre.

Cette recherche est menée dans deux domaines d'application différents :

- le premier concerne la mise en place de systèmes de gestion d'images dans les hôpitaux (systèmes appelés PACS[1] dans la littérature anglo-saxonne) ; ces systèmes posent le problème de l'interopérabilité entre les équipements d'imagerie et les systèmes d'information ;
- le second concerne la gestion de connaissances anatomiques et fonctionnelles sur le système nerveux central ; dans ce cas particulier on s'intéresse aux signaux et images en tant que connaissances relatives au cerveau (cerveaux particuliers ou cerveau en général), susceptibles d'être utilisées pour des applications d'aide à la décision (diagnostic, planning chirurgical) ou pour des applications de recherche (étude de la variabilité anatomo-fonctionnelle cérébrale).

Ces deux thèmes de recherche ont ceci de commun qu'ils visent à concevoir des *systèmes d'information* pour faciliter l'accès aux images médicales (les données) et aux informations susceptibles d'aider à leur compréhension et leur exploitation (les connaissances). Ces deux thèmes sont abordés avec une même méthodologie, qui fait apparaître les quatre composantes suivantes :

- la *modélisation des informations*, qu'il s'agisse de données brutes (données numériques recueillies chez un patient à des fins diagnostiques ou thérapeutiques), ou de données ayant fait l'objet d'une interprétation (par exemple résultats d'un processus d'étiquetage de données brutes ou de description symbolique de ces données) ;
- la *modélisation des modes d'accès et des processus d'échanges de ces informations* dans différents contextes ; ceci amène à expliciter l'architecture des systèmes en spécifiant les rôles de chaque composant, selon une approche systémique ;
- la *validation de ces modèles*, à la fois formelle - à l'aide des outils de modélisation eux-mêmes - et pratique - par la mise en œuvre de systèmes d'information supportant des applications cliniques ou de recherche dans le domaine de la compréhension ou l'exploitation des images ;

[1] PACS: Picture Archiving and Communication Systems

- enfin, l'*exploitation* et la *promotion* de ces modèles dans le contexte de la standardisation internationale.

Le développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication et leur utilisation dans le contexte médical donnent un intérêt et une actualité tout particuliers aux travaux menés sur ces thèmes. En effet le partage et la ré-utilisation des données médicales dans le cadre de systèmes d'information hospitaliers intégrés, de réseaux de soins ou d'entrepôts de données et de connaissances, ne pourront être mis en œuvre de façon harmonieuse que si ceux-ci s'appuient sur une bonne compréhension des problèmes d'interopérabilité syntaxique et sémantique sous-jacents, et sur des méthodes structurées pour les aborder. Ces éléments, de nature technique, sont les seuls discutés dans le cadre de ce document de synthèse. Les autres (aspects organisationnels, réglementaires, déontologiques, médico-économiques) sont également primordiaux mais sortent du cadre étudié ici.

La suite du document est composée de deux parties principales. La première s'intéresse à l'*interopérabilité entre les équipements d'imagerie au sein de systèmes d'information intégrés*, et la seconde à la *représentation et la gestion de connaissances numériques et symboliques associées aux images*. Chacune est elle-même composée de trois parties, (1) exposé de la problématique et de l'état de l'art, (2) présentation de nos différentes contributions au domaine et enfin (3) discussion des perspectives.

2. Interopérabilité entre les équipements d'imagerie au sein de systèmes d'information intégrés

2.1. Problématique et état de l'art

Ce chapitre présente l'évolution des concepts inhérents à la gestion des images numériques à l'hôpital. Il retrace comment on est passé d'une vision centrée sur l'interconnexion d'équipements (comme des sources d'images ou des serveurs de stockage) à la prise en compte réelle du problème de la gestion des images, puis à une vision globale qui replace l'image dans le contexte général de la gestion de l'information médicale à l'hôpital. Nous avons donc séparé l'exposé de la problématique en deux parties, intitulées respectivement *les PACS et la gestion des images* et *la problématique de l'intégration*.

2.1.1. Les PACS et la gestion des images

2.1.1.1. Motivations

Le terme PACS (Picture Archiving and Communication System) a été introduit au début des années 80 pour désigner des systèmes informatisés de communication et de stockage d'images à l'hôpital. Il s'agissait de remplacer le film, support traditionnellement utilisé pour acquérir, lire, communiquer et archiver les images médicales par des supports et des outils informatiques. Quand on se replace dans le contexte de l'époque (années 82-83) on constate que les motivations étaient de natures très diverses : (1) d'ordre médical et organisationnel, (2) liées aux potentialités de traitement de l'image numérique, (3) d'ordre technologique, et (4) d'ordre économique et industriel.

Motivations d'ordre médical et organisationnel

L'évolution rapide de l'imagerie médicale à la fin des années 70 et au début des années 80 a conduit à poser le problème de la communication et de l'archivage des images au sein des départements de radiologie. En particulier, les volumes de données importants produits par les sources d'images numériques et la croissance de ces volumes nécessitaient de trouver rapidement des solutions appropriées. Aussi l'idée d'utiliser des ressources informatiques pour communiquer et archiver les images s'est imposée naturellement.

Motivations liées aux potentialités de traitement de l'image numérique

Ces potentialités vont depuis l'amélioration de la lecture des images (manipulation, fenêtrage), jusqu'au traitement (en 2D et en 3D) et à la fusion d'images de modalités différentes, notamment dans des applications de type planning thérapeutique assisté par ordinateur. Ces potentialités ont suscité un vif intérêt auprès du milieu universitaire qui voyait s'ouvrir un domaine de recherche très riche d'applications et encore inexploré. Quand on relit les publications des années 82-83 on est toutefois surpris par l'amalgame qui est fait entre des apports du PACS immédiats et quasi certains et des apports potentiels, ou hypothétiques.

Sentiment d'opportunités technologiques

Le début des années 80 a été marqué par des progrès technologiques importants dans les domaines de l'informatique et des communications : apparition et développement rapide de la technologie des réseaux locaux, baisse des coûts des mini-ordinateurs, apparition des micro-ordinateurs et des stations de travail, apparition de supports de stockage de haute capacité (disques optiques numériques). Ces progrès ont pu laisser croire que les briques technologiques nécessaires à la constitution d'un PACS étaient disponibles. On a pu constater depuis combien cette appréciation était erronée. L'erreur d'appréciation a concerné à la fois le niveau de maturité de la technologie disponible à l'époque mais également les effets négatifs pouvant résulter d'une évolution technologique rapide à savoir l'obsolescence rapide des matériels et des logiciels.

Sentiment d'enjeux économiques et industriels importants

La plupart des publications des années 82-83 font état d'économies importantes, susceptibles d'être apportées par les PACS. Là encore, on constate rétrospectivement qu'on a souvent extrapolé quelques études économiques comparant le coût d'archivage sur film argentique avec le coût d'archivage sur des supports informatiques [Dwyer 82a]. La distinction n'était pas clairement faite entre les gains directs (films, appareils et consommables pour le développement des films, personnels chargés de la gestion des films), et les gains indirects obtenus à tous les niveaux de la chaîne de production et d'utilisation de l'image. Plus hypothétiques encore étaient ceux qui pouvaient résulter de la réduction des durées de séjour des patients ou de l'optimisation des stratégies diagnostiques et thérapeutiques. Sur le plan industriel, les constructeurs informatiques (systèmes de stockage, réseaux locaux) ont senti qu'un marché important pouvait s'ouvrir dans ce domaine et se sont donc associés à certaines expérimentations. On constate en revanche une certaine réserve des industriels de l'imagerie médicale à cette époque, suivant de loin cette évolution du marché, sans chercher à la devancer.

Ces différentes motivations, catalysées par l'enthousiasme du milieu universitaire pour ces nouvelles technologies ont conduit un grand nombre d'équipes à se lancer dans des expérimentations [Gibaud 93b]. Les toutes premières ont concerné le service de radiologie de l'université du Kansas, en partenariat avec NCR [Dwyer 82b, Bulatek 83], le département de radiologie du New York University Medical Center [Maguire 82, Horii 83, Cywinski 83], le département des sciences radiologiques de UCLA [Huang 83a, Huang 83b], le Mallinckrodt Institute of Radiology à St Louis [Cox 82, Blaine 83], l'université de Pennsylnanie à Philadelphie [Arenson 82, Arenson 83], ainsi que l'université de Caroline du Nord à Chapel Hill. C'est dans le contexte et l'état d'esprit de cette époque qu'il faut replacer le lancement à Rennes du projet SIRENE, que nous évoquerons plus loin dans ce document. La plupart de ces expériences pionnières affichaient l'ambition de mettre en place rapidement des PACS opérationnels et manifestaient à cet égard un certain manque de réalisme, compte tenu des difficultés d'une telle entreprise. On avait affaire à une approche de type "pilotée par la technologie", plutôt que par les besoins des utilisateurs.

On a pu constater à partir de 1988 une évolution des travaux scientifiques menés sur les PACS, se traduisant par des projets mieux ciblés, plus limités dans leurs ambitions et qui, globalement, ont fait progresser la réflexion sur ce qu'est un PACS, sur la méthodologie à déployer pour conduire de tels projets et sur les éléments de valeur ajoutée que l'on peut en attendre par rapport aux systèmes traditionnels fondés sur l'utilisation du film.

De façon globale on peut considérer que la totalité des expériences menées entre 1982 et 1990 et destinées à mettre en place en site clinique des systèmes PACS opérationnels se sont traduites par des échecs. Ce terme d'échec mérite toutefois quelques explications. Les publications de cette époque mettent le plus souvent en avant les aspects technologiques de ces projets (nouveaux écrans de visualisation, nouveaux réseaux, nouveaux supports de stockage, et soulignent (à juste titre !) les prouesses techniques que constituaient la mise au point et l'interconnexion de tous ces équipements. Le qualificatif d'échec a d'ailleurs le plus souvent été porté a posteriori - cinq ans ou dix ans après ces expériences pionnières - quand, l'expérience aidant, on s'est plus intéressé à l'apport réel de ces systèmes à leurs utilisateurs radiologues ou cliniciens. De fait, il fallait bien constater que fonctionnellement ces systèmes n'étaient guère utilisables pour faire ce pour quoi ils avaient été conçus, à savoir interpréter des images radiologiques, les transmettre aux médecins demandeurs, les archiver et pourvoir les retrouver ultérieurement dans le cadre de la prise en charge des patients. L'échec le plus tangible est certainement l'échec industriel puisqu'on peut considérer que le marché des PACS n'a commencé à "décoller" réellement aux USA qu'à partir des années 95-96, suite aux résultats globalement probants des expériences de "PACS sans film" menées dans plusieurs hôpitaux militaires américains (projet MDIS). En ce qui concerne l'Europe, et si l'on met à part le cas des pays nordiques on peut constater que ce marché des PACS est encore aujourd'hui dans l'expectative.

2.1.1.2. Analyse de l'échec des expériences pionnières (82-90)

Les raisons de ces échecs sont multiples et ont été abondamment analysées dans la littérature [par exemple, Maguire 88, De Valk 92, Saranummi 92]. En ce qui nous concerne ici nous limitons notre analyse aux aspects techniques de la question (tout en reconnaissant l'importance - peut-être d'ailleurs primordiale - des autres aspects : organisationnels, sociologiques, économiques, etc.). Trois facteurs particuliers, selon nous, ne ressortent pas suffisamment de ces analyses et nous paraissent cependant capitaux pour comprendre ces échecs et progresser dans la recherche de solutions industrielles.

1. Compréhension et prise en compte du processus général de production et d'utilisation des images

Dans le développement des PACS, l'accent avait surtout été mis sur l'aspect technologique du problème et sur l'adéquation des technologies disponibles, plutôt que sur l'aspect fonctionnel. Cette insuffisance de l'analyse du rôle de l'image dans les processus de délivrance des soins a conduit à mettre en place des infrastructures matérielles et logicielles pour communiquer et stocker les images, mais faute d'une bonne compréhension des processus général de production et d'utilisation des images, les systèmes résultants sont restés fondamentalement manuels dans leur conception, c'est à dire incapables de prendre par eux-mêmes les décisions adéquates relatives au déplacement et au stockage des images. Cette réticence à expliciter le processus de circulation et d'utilisation des images s'explique par le caractère nécessairement réducteur de cette démarche : en effet, dans l'esprit des médecins, le système se devait d'offrir une souplesse maximale pour permettre de retrouver et d'accéder à n'importe quel dossier (dans la limite des règles de confidentialité), que ce soit à des fins cliniques, d'enseignement, ou de recherche, quelles que puissent être la complexité et la durée de telles recherches. De ce fait, il paraissait difficile d'enfermer le fonctionnement d'un PACS dans le carcan d'un modèle de "workflow". De fait un hôpital n'est pas une usine, et les processus de délivrance des soins ne possèdent pas le déterminisme des processus de fabrication assistée par ordinateur. Néanmoins, on a l'impression que faute d'avoir su modéliser et automatiser convenablement l'ensemble des processus de diffusion et d'archivage des images, on a préféré

mettre en place des infrastructures de communication et de stockage, avec un fonctionnement essentiellement manuel.

2. Aspect industriel et marché des composants d'un PACS

Le second aspect concerne l'aspect industriel de la question. A première vue, on a affaire ici à un cercle vicieux. Les expériences pionnières n'ont pas été suivies par un équipement significatif en PACS de la part des hôpitaux car il ne 'est pas constitué d'offre industrielle *adéquate* pour construire des PACS, et une telle offre n'a pas vu le jour parce que, probablement, il n'existait pas encore de marché pour ces systèmes. En fait, ce problème d'*adéquation* de l'offre industrielle se situe à deux niveaux : (1) le premier est de nature technique, et concerne la définition précise des contours fonctionnels (rôle) de chaque composant d'un PACS (source d'images, station d'interprétation, système de stockage, gestionnaire des flux d'images, etc.) et les modalités d'inter-fonctionnement avec les autres composants du PACS. Il est certain que l'absence de consensus sur l'architecture et l'absence de standards ont limité sévèrement le développement d'une offre industrielle. (2) Le second niveau est de nature économique. On entend ici par offre industrielle *adéquate* une offre dont le coût est en rapport avec la valeur ajoutée que les utilisateurs peuvent attendre d'un tel système, par rapport à la situation traditionnelle fondée sur l'utilisation du film.

3. Progrès technologiques dans le domaine de l'informatique et des communications

Les progrès technologiques dans ce domaine (augmentation de la puissance des ordinateurs, du débit des composants réseaux, de la capacité des espaces de stockage) ont été constants entre 1980 et 1990, avec une baisse tout aussi constante des coûts de ces composants. Ceci constitue à long terme un facteur évidemment favorable pour le développement des PACS. Pour autant, à une échelle de temps plus réduite ces évolutions posent le problème de l'obsolescence rapide des systèmes mis en place. En effet, comment faire comprendre à un responsable de service de radiologie ou à un directeur d'hôpital que le système acheté il y a deux ou trois ans est déjà obsolète, et que l'investissement doit être en grande partie renouvelé. Ce facteur explique une certaine réticence à investir vers une technologie qui ne semble pas stabilisée.

Ces trois aspects soulignent l'importance des aspects fonctionnels et architecturaux dans la définition des composants des PACS. Le rôle des standards est évidemment fondamental pour garantir l'interopérabilité au sein du système et la pérennité des investissements, elle même tributaire de la pérennité de l'architecture. C'est précisément sur ces thèmes que nous avons apporté des contributions intéressantes dans le cadre du projet MIMOSA décrit plus loin, en mettant l'accent sur une approche systémique de la gestion des images.

2.1.1.3. La gestion des images

L'importance du temps d'accès aux images pour l'acceptation globale d'un PACS avait été soulignée très tôt par de nombreux auteurs [par exemple Maguire 82, Duerinckx 82, Thomas 82, Kasday 86]. La littérature des PACS a abordé le problème de la gestion du temps d'accès aux images avec trois concepts principaux :

- le *pré-chargement* (ou *preloading*) consiste à transmettre à l'avance les images qui doivent être utilisées dans le cadre d'une tâche précise, comme par exemple une séance d'interprétation d'images ou une procédure de planning chirurgical ;
- la *sélection/récupération* (ou *prefetching*) consiste à rendre disponibles un sous-ensemble des images antérieures du patient, à savoir celles qui sont susceptibles d'être utiles dans le cadre d'une tâche prévue ; le processus comprend généralement deux aspects : la sélection des examens pertinents dans le cadre de la tâche visée et le déplacement effectif des images ;
- la *gestion d'archives hiérarchisées* consiste à organiser le stockage des images sur différents types de supports, avec des mécanismes de migration entre les différents niveaux de la hiérarchie [Dwyer 82b, Meyer-Ebrecht 82, Zeleznik 83]. Ainsi, les supports rapides (qui sont également les plus coûteux) sont réservés aux images pour lesquelles la probabilité d'accès est la plus grande, alors que les supports à accès lents (moins onéreux) sont utilisés pour le stockage des images qui ont une faible probabilité d'être utilisées (archives dormantes).

Les mécanismes de sélection/récupération et de gestion d'archives hiérarchisées ont donné lieu à de nombreux travaux. Certains auteurs ont cherché à préciser les règles de pertinence des examens antérieurs [par exemple Bakker 86, Levin 90]. D'autres ont défini a priori des niveaux de stockage en leur associant une signification précise (par exemple images des patients en cours d'hospitalisation) et ont étudié comment on pouvait estimer la taille des espaces et les technologies de stockage appropriées, à partir des probabilités d'accès aux images stockées à ces différents niveaux [Sherman 88, Martinez 88a, Martinez 88b]. Certains travaux ont proposé d'automatiser les opérations de migration et de pré-chargement en les déclenchant suite à des événements concernant le patient ou les résultats des examens (par exemple admission ou sortie d'un patient,

validation de l'interprétation des images par le radiologue), ou en prenant en compte un contexte plus complexe, au moyen de systèmes experts [Martinez 88b]. Certains travaux de simulation ont cherché à prévoir les gains de performances que l'on peut attendre de l'automatisation des transferts d'images [par exemple Stut 88, D'silva 88, Fisher 88].

Toutefois, bon nombre de ces travaux sont restés à l'état de simulations [Creasy 86, Taira 88, Mankovitch 88, D'Lugin 90] sans déboucher sur une mise en œuvre concrète.

Les expériences menées à partir de 1990 sont allés plus loin dans l'analyse et l'implémentation de mécanismes destinés à anticiper et automatiser les transferts d'images. Les principales contributions ont été apportées par l'Université d'Arizona à Tucson, par les sociétés Siemens et Loral, ainsi que les sites de UCLA et UCSF.

• Les travaux menés à l'Université de l'Arizona par l'équipe de Liu Sheng concernaient la sélection/récupération des images pertinentes pour le diagnostic primaire d'examens radiologiques. Ils abordaient le problème de la disponibilité au moyen d'une base de données distribuée, au sein de laquelle les migrations entre espaces de stockage étaient contrôlées par un système expert [Liu Sheng 90a, Liu Sheng 92a]. Le problème clé était celui de l'acquisition des connaissances pour la détermination des images pertinentes. Une première génération du système a utilisé des règles de production élaborées à partir d'interviews et de discussions avec des experts [Liu Sheng 90b, Liu Sheng 92b, Liu Sheng 94]. Ensuite, deux approches différentes pour l'acquisition des connaissances ont été proposées, l'une utilisant des réseaux de neurones et l'autre des arbres de décision [Liu Sheng 95].

• Les systèmes proposés par les sociétés Siemens et Loral ont été les premiers à maturité sur le plan industriel [Smith 92]. Ils ont été mis en place dans plusieurs hôpitaux comme par exemple le Madigan Army Medical Center à Tacoma (Washington) ou à l'hôpital Hammersmith à Londres. Ces systèmes utilisaient 3 niveaux de stockage : un archivage à long terme (à la fois en ligne et hors ligne), un archivage à court terme et un stockage local au niveau des stations de travail. En fait, ces deux derniers niveaux étaient implémentés au sein d'une même entité appelée Unité de Stockage de Travail (Working Storage Unit) capable d'accueillir à la fois les images produites récemment et les examens antérieurs jugés pertinents [Smith 92, Glicksman 92, Wilson 94]. La gestion de la pertinence était envisagée au travers de deux concepts : (1) le segment de dossier, actif ou inactif selon l'âge des examens, et (2) les dossiers thématiques de différents types, organisés par modalité, par organe, ou sur des critères cliniques. La gestion de la sélection/récupération était traitée de façon différente dans le service de radiologie et dans les unités de soins. En radiologie elle s'appuyait sur les données de planification des examens alors que dans les unités de soins, elle s'appuyait surtout sur les informations relatives aux mouvements des patients (admissions, sorties) [Glicksman 93].

• Le PACS de UCLA a implémenté à partir de 1990 des facilités de routage automatique des images. Ce routage mettait en jeu des passerelles (appelées Capture Computer) chargées de recevoir les images transmises par les sources et de les transmettre vers des entités intelligentes appelées "Cluster Controller". Ces entités configurables avaient pour fonctions principales : (1) d'envoyer les images vers les archives et les stations de travail, (2) de demander le transfert des images antérieures pertinentes vers les stations de travail et (3) d'effacer les images au niveau des passerelles [Huang 92, Taira 92]. Le mécanisme de sélection/récupération utilisé se fondait sur l'appréciation de la corrélation entre le nouvel examen produit et les examens antérieurs, en fonction de l'organe exploré, de la technique d'imagerie utilisée et de l'objectif de l'examen. Ce système, tel qu'il était décrit en 1992 n'anticipait que faiblement les transferts d'images, puisqu'il ne cherchait pas à exploiter les données de planification des examens pour les rendre plus rapidement accessibles pour les utilisateurs (désarchivage). En revanche, les serveurs d'archives gèraient différents niveaux de priorité pour traiter en priorité les demandes émanant des stations de visualisation [Wong 92]. Si le souci de prendre en compte des événements relatifs à la planification des examens et les mouvements du patient était exprimé [Chao 95], il semble qu'en pratique, les efforts visaient davantage à mieux informer l'utilisateur du délai d'accès aux images que réellement à augmenter leur disponibilité [Chen 95].

• Les travaux menés à partir de 1993 à UCSF ont notamment porté sur le mécanisme de sélection/récupération. La solution proposée se fondait sur la communication avec le SIH et le SIR (messages HL7) pour prendre en compte des événements en rapport avec le cycle de vie de l'examen et les admissions / sorties des patients. Le mécanisme utilisait différents paramètres comme l'origine du patient, le médecin demandeur, l'emplacement de la station de travail à utiliser, le nombre et l'âge des images antérieures. Les données pertinentes étaient sélectionnées principalement à l'aide d'une table à quatre entrées : type d'examen, type de pathologie, spécialité radiologique et médecin demandeur [Wong 94, Wong 95].

Tous ces travaux pour la plupart issus d'expériences en sites ont permis de valider les concepts généraux inhérents à la gestion des images, concepts qui sont aujourd'hui implémentés dans la plupart des systèmes de gestion d'images offerts sur le marché. Ceci dit ces processus de gestion restent aujourd'hui encore organisés

autour d'une vision très traditionnelle des données images, qui n'intègre nullement la dimension potentiellement multimédia des documents médicaux (par exemple comptes-rendus radiologiques multimédia, comptes-rendus opératoires multimédia). De même, ils n'ont guère fait progresser l'aspect architectural de la question, pourtant à notre avis essentiel pour permettre l'émergence de solutions industrielles pour les PACS : définition précise des différents composants du PACS et des modalités d'inter-fonctionnement entre eux, communication entre systèmes d'information départementaux (plateaux techniques, unités de soins), intégration des images au sein d'un dossier patient à l'échelle de l'établissement.

2.1.2. La problématique de l'intégration

2.1.2.1. L'intégration : contexte et domaine de l'étude

Au cours des 15 dernières années, la mise en place des Systèmes d'Information Hospitalier dans les entreprises de santé met en évidence une segmentation verticale des applications (gestion administrative, laboratoires, radiologie, etc.), sans considération particulière pour l'intégration de ces applications [Winsten 96]. Cette observation peut également s'appliquer aux systèmes d'information déployés dans les services d'imagerie pour mieux organiser l'acquisition des images médicales, leur interprétation et la délivrance des résultats aux cliniciens demandeurs. Ces systèmes d'information se sont constitués progressivement par l'agrégation de composants initialement conçus pour fonctionner de façon autonome : équipements d'imagerie, consoles de visualisation, systèmes de gestion d'images, Systèmes d'Information Radiologique (SIR), autres composants du Système d'Information Hospitalier (SIH). Ce processus de construction par agrégation a conduit à un niveau minimal d'intégration, insuffisant pour atteindre les nouveaux objectifs et les nouvelles contraintes assignés aux entreprises de santé, à savoir :

- maîtrise voire réduction des coûts par des gains d'efficacité, en particulier rationalisation de la saisie des informations (de façon à éviter les saisies multiples) et réutilisation de celles-ci dans des contextes multiples (délivrance des soins, gestion financière, audit qualité, enseignement, recherche)
- contraintes de qualité globales au niveau de l'entreprise de santé (services offerts aux patients, satisfaction des cliniciens utilisateurs du système)
- contraintes de sécurité/confidentialité plus globales
- vision plus globale des données médicales, centrée autour du patient, et donc indépendante des conditions matérielles de recueil de ces données (unités de soins, séjours ou épisodes successifs)
- intégration des données médicales au sein de véritables documents multimédia, associant données textuelles, données structurées, images, etc.

Ces progrès ne seront pas obtenus sans douleur. En effet, comme le souligne R. Korpman de façon un peu provocatrice "systems based on departmental models may take excellent care of specimens but generally fail in the care of patients, and patient care is what health care is about" [Winsten 96]. En d'autres termes, l'optimisation globale ne saurait résulter de la seule optimisation des composants. Il est donc nécessaire de repenser globalement la fonction du système et de ses acteurs pour en déduire une meilleure définition des composants et de leurs articulations. Bien entendu ces mutations ne peuvent se faire du jour au lendemain compte tenu des investissements très importants consentis dans la mise au point et le déploiement des systèmes actuels, tant par les entreprises de santé que par les constructeurs.

L'analyse qui suit concerne principalement le domaine des PACS, même si les concepts et approches que nous décrivons trouvent des applications au delà de ce domaine. Nous rappelons tout d'abord les motivations qui sous-tendent l'effort d'intégration et nous analysons différentes approches pour y parvenir, en nous focalisant sur le plan technique ; là encore d'autres niveaux d'étude (niveau social, niveau économique, etc.) seraient certainement également pertinents et importants, mais sortent du cadre discuté ici.

Nous avons adopté un point de vue à la fois théorique et pragmatique vis à vis du problème ; les communautés des utilisateurs et des industriels du domaine sont forcément plus sensibles à une vision pragmatique, mais il nous a semblé important de ne pas perdre de vue l'aspect théorique de la question. Nous détaillons différentes approches de l'intégration, en soulignant les possibilités et les limites de chacune, ainsi que leur complémentarité.

2.1.2.2. Définitions

Il convient tout d'abord de distinguer le concept d'intégration en tant que *propriété* d'un système (on parle de système intégré), du concept d'intégration au sens d'un *processus* tendant à transformer un système pour en faire un système intégré.

Intégration en tant que propriété

Un système intégré est un système qui organise les interactions avec les utilisateurs humains en privilégiant la saisie et l'utilisation en temps réel des informations, qui minimise les saisies multiples et facilite la réutilisation des données au profit des différentes activités de l'entreprise (délivrance des soins, gestion administrative et financière, pilotage, auto-évaluation et audit, recherche, enseignement). Il découle de cette définition qu'un système intégré est capable de faire abstraction d'un découpage en sous-systèmes dédiés aux différentes unités fonctionnelles (SIUS, SIR, Fichier central des patients, facturation des soins, etc.)

Démarche ou processus d'intégration

Une démarche d'intégration consiste à faire évoluer un système construit par juxtaposition d'applications largement autonomes et conçues indépendamment les unes des autres pour doter le système global des propriétés d'un système intégré décrites précédemment. On distingue souvent un processus d'intégration verticale, qui vise à automatiser l'enchaînement des traitements dans une unité fonctionnelle donnée, de l'intégration horizontale qui facilite le partage et la réutilisation des données entre différentes unités fonctionnelles.

2.1.2.3. Principaux aspects de l'intégration et valeur ajoutée

Principaux aspects de l'intégration

La liste qui suit met l'accent sur différents aspects de l'intégration, sans prétendre ni à l'exhaustivité ni à l'indépendance de ces aspects.

- Enchaînement des tâches : on a parfois utilisé les termes de "coordination comportementale" [Toussaint 97] ou d' "intégration fonctionnelle" [Leisch 97]. On entend par là l'automatisation de certains processus à partir du moment où ils s'avèrent suffisamment structurés et reproductibles. Il s'agit par exemple des interactions de type constitution de listes de travail (worklist) consistant par exemple pour une source d'image ou une station de travail à interroger un composant du système responsable de l'organisation des tâches et à récupérer les données nécessaires à l'exécution de cette tâche.
- Partage des données médicales qui concernent un patient entre les professionnels de santé, par exemple : production de comptes-rendus associant des procédures d'imagerie et les résultats d'examens d'anatomie pathologique ; notification automatique d'un résultat d'analyse urgent vers le service clinique demandeur.
- Partage et réutilisation des données pour des buts différents de ceux ayant motivé leur recueil, par exemple : les résultats d'une série d'examens de laboratoire sont utilisés comme données médicales pour motiver un examen d'imagerie ; des éléments relatifs à des séjours successifs du patient sont rassemblés pour faciliter la rédaction de l'histoire clinique lors d'un nouvel épisode de soins ; des éléments de codification de la pathologie saisis dans le cadre de comptes rendus radiologiques sont utilisés pour la production de statistiques et d'études a posteriori sur le caractère approprié des différents types d'examens ; des éléments tangibles enregistrés dans le cadre du contrôle du workflow peuvent être réutilisés pour des mesures de l'efficacité du système (au sens large).
- Intégration de l'accès au système via une plateforme universelle ; gestion intégrée des processus de connexion (log-in) et de gestion des droits d'accès.
- Création et réutilisation de connaissances à partir de données gérées par le système, et application de ces connaissances dans des processus de résolution de problèmes.

Le tableau 1 résume les principaux aspects fonctionnels de l'intégration et souligne les éléments de valeur ajoutée qui en découlent [Mohr 97].

Aspects de l'intégration	Valeur ajoutée
Enchaînement des tâches (réalisation, enchaînement, contrôle)	Efficacité, exhaustivité, traçabilité Rapidité
Partage des données médicales entre les professionnels de santé	Qualité et continuité des soins Sécurité du patient
Partage et réutilisation des données pour des buts différents (données médicales notamment)	Efficacité Réduction du nombre d'examens redondants ou inutiles Sécurité du patient
Plateforme universelle d'accès et gestion intégrée des processus de log-in et de gestion des droits d'accès	Cohérence et ergonomie du système Sécurité des données
Création et réutilisation de connaissances	Formalisation de la connaissance, enrichissement du capital informationnel Gains d'efficacité (puissance de résolution)
Intégration de données de natures différentes au sein de documents multimédia (textes, images, etc.)	Exhaustivité, documentation explicite du diagnostic

Tableau 1 : Aspects de l'intégration et éléments de valeur ajoutée

Efficacité, exhaustivité, traçabilité : permet de vérifier que toutes les tâches programmées ont effectivement été réalisées, de contrôler les délais d'exécution, de gérer des priorités

Rapidité : permet de commencer la tâche suivante aussitôt que les résultats de la tâche précédente sont disponibles

Qualité et continuité des soins : sans coordination suffisante entre les acteurs de santé, l'évolution de la médecine vers l'hyper-spécialisation peut s'avérer dangereuse car la pathologie n'est pas toujours aussi "séparable"

Sécurité : le partage de données médicales comme "les traitements en cours" ou "les allergies connues" constitue un facteur important pour la sécurité du patient

Efficacité : la réutilisation des informations évite les saisies multiples, sources d'erreurs et de dépenses inutiles des ressources

Réduction du nombre d'examens redondants ou inutiles : l'accès à des informations médicales auprès des autres unités de soins ou services prestataires permet d'éviter des examens inutiles

Formalisation de la connaissance, enrichissement du capital de connaissances : par exemple la sélection, la validation et la thésaurisation de cas cliniques correspond à une capitalisation de la connaissance que l'entreprise peut valoriser de façons multiples sous forme d'enseignements (formation initiale et continue) ou de services offerts à d'autres institutions de santé

Gains d'efficacité (puissance de résolution) : les connaissances capitalisées peuvent être utilisées dans le cadre de systèmes d'aide à la décision et conduire à une augmentation de la qualité des soins

Exhaustivité, **documentation explicite du diagnostic** : l'intégration au sein d'un même document d'éléments textuels et d'images permet de mieux documenter le résultat de l'examen, et de faciliter sa compréhension

2.1.2.4. Conception d'un système intégré : l'approche rationnelle

Principe

Sur un plan théorique, la conception d'un système d'information intégré suppose une vision globale et consensuelle de l'ensemble des activités de l'entreprise, à un instant t. Ceci recouvre :

- la compréhension des buts de l'entreprise,
- la connaissance du savoir-faire actuel (procédures en vigueur pour exercer les différents métiers de l'entreprise),
- la connaissance des défauts organisationnels auxquels on souhaite remédier pour optimiser l'efficacité et la satisfaction des utilisateurs et des clients,
- l'existence d'un langage commun permettant le partage de l'information entre tous les acteurs de l'entreprise,
- l'existence d'un système de valeurs permettant d'arbitrer entre différents choix possibles.

Il s'agit en particulier d'expliciter l'ensemble des traitements d'information qui interviennent dans l'exercice des différents métiers de l'entreprise [Prince 96, Booch 92]. Ceci recouvre trois aspects principaux:

- l'identification des processus et la compréhension des rôles des différents acteurs ; il peut s'agir de tâches cliniques comme la délivrance des soins au patient, et la prise de décisions diagnostiques ou thérapeutiques ; il peut s'agir de tâches d'organisation et de supervision du travail, de communication de l'information, etc. ;
- la délimitation entre les tâches réalisées par des acteurs humains et celles dévolues à des agents cognitifs artificiels (composants logiciels du système d'information). L'effort d'automatisation portera notamment sur l'organisation du travail et la gestion des ressources (enchaînement des tâches, contrôle), plus faciles à formaliser. Les tâches cliniques, qui sont de nature "intellectuelle" ne peuvent pas être automatisées dans la mesure où les processus de raisonnement ne peuvent être entièrement décrits et formalisés. On peut donc au mieux les assister au moyen de composants logiciels dédiés (par exemple, aide à la prescription, aide au diagnostic, aide à l'interprétation).
- la formalisation détaillées des traitements réalisés par le système.

La conception d'un SI suppose la modélisation des processus de traitement et de gestion des informations (processus, événements, relations de causalité, etc.), ainsi que la modélisation des informations elles-mêmes (entités, relations, états, etc.). La modélisation de ces processus suppose qu'ils soient suffisamment significatifs. On veut dire par là qu'il existe une structuration, une reproductibilité, une protocolisation suffisante de l'activité [Meetz 99]. Au niveau des informations, le même effort d'abstraction est nécessaire pour dégager du domaine étudié les concepts et objets les plus pertinents, pour les structurer en une ontologie (définition des termes et de leur structure) à partir de laquelle les fonctions de traitement de l'information pourront être définies de façon explicite et non ambiguë.

Sur un plan théorique la décomposition d'un système complexe en plusieurs sous-systèmes comprend deux aspects, en principe indépendants, et étudiés successivement au cours de la conception : le premier aspect relève du souci de diminuer la complexité de l'analyse en séparant les composants indépendants ou faiblement couplés. Le second concerne l'implémentation, c'est à dire la réalisation du système sous la forme de plusieurs sous-ensembles plus ou moins autonomes, en fonction de paramètres et contraintes multiples telles que les performances d'exécution, la nécessité de redondances au niveau des données et des processus. Il faut toutefois remarquer que, comme on le verra plus loin, la découpe en sous-systèmes résulte en fait principalement de facteurs d'organisation du marché.

Remarques concernant cette vision théorique du problème

Cette vision théorique s'avère en pratique irréaliste pour des raisons multiples.

Caractère global et consensuel de l'analyse

Pour des raisons de faisabilité pratique, l'analyse est réalisée au sein de sous-groupes définis sur la base de leur fonction (par exemple plateaux techniques, unités de soins, services administratifs et financiers) et non de façon globale. Ceci conduit inévitablement à modéliser les mêmes informations de façons multiples et par là même potentiellement incohérentes entre elles. Par exemple, si la modélisation des demandes d'examens est menée séparément au niveau des unités de soins dans le cadre d'un SIUS et au niveau d'un plateau technique prestataire, il est vraisemblable qu'on constatera des divergences notables : par exemple, côté unité de soins on sera naturellement enclin à privilégier l'aspect clinique, la motivation de la demande, ainsi que sa globalité vis à vis du service prestataire, alors que du côté du service prestataire on aura un point de vue plus analytique guidé par le souci de planification du travail et d'optimisation des ressources.

On peut également observer des divergences de vue quant à la légitimité de certains traitements d'informations. Ceci résulte de différences pouvant exister au niveau des missions et donc du système de valeurs propres à chaque sous-ensemble fonctionnel. Par exemple, les données relatives au timing d'enchaînement des tâches recueillies au sein d'un système départemental dans le cadre d'un système de workflow peuvent en principe également être utilisées par le service du personnel dans le cadre de la comptabilité analytique. La légitimité d'une telle ré-utilisation peut dans certains cas être contestée. Ce genre de difficultés peut constituer un obstacle vis à vis de l'effort d'intégration. L'intérêt de l'approche globale est d'affirmer une politique globalement cohérente et donc de procéder d'emblée à la recherche d'un consensus sur ce qui est acceptable et le cas échéant d'arbitrer entre les intérêts particuliers des sous-unités.

Analyse à un instant t

De par son caractère global, cette approche ne peut être mise en œuvre de façon rapide ; ceci pose problème dans un contexte d'évolution rapide des besoins et des processus organisationnels. En pratique on assiste donc inévitablement à une conception itérative, extrapolant les modes de fonctionnement des systèmes futurs à partir d'une compréhension des limitations des systèmes actuels et des nouvelles possibilités offertes par la technologie.

Découpe en sous-systèmes

Le second écueil de l'approche théorique est le fait qu'elle ignore que la construction et la mise en place d'un système en site se trouve très fortement contrainte par l'offre, et non par la demande, pour des raisons non pas techniques mais économiques. En effet on peut bien sûr imaginer une approche purement "top-down" du problème, conduisant une entreprise de santé à spécifier de façon précise le système qu'elle souhaite acquérir et l'articulation des différents sous-systèmes. Toutefois en pratique une telle approche "sur mesure" s'avérerait extrêmement coûteuse. Ce type d'approche même si elle peut paraître séduisante, se heurte donc tôt ou tard aux réalités du marché (appel d'offre MDIS[1] pour l'équipement de plusieurs hôpitaux américains [MDIS 90], appels d'offres de l'AP-HP[2] pour le projet MIRIAM [Forte 95]).

Conclusion de l'approche théorique

Celle-ci met l'accent sur la nécessité de s'appuyer sur un modèle global et cohérent des processus de traitement des informations et des informations elles-mêmes. Ces modèles doivent par ailleurs être partagés au niveau d'un nombre significatif d'entreprises de santé pour pouvoir être adoptés par l'industrie et utilisés dans la conception et l'implémentation des produits (définition du contour fonctionnel des produits et des modalités d'échange d'informations). On appellera dans la suite de tels modèles "modèles de référence du domaine". Sur ce plan, tout ou presque reste à faire. Toutefois les travaux menés depuis 10 ans dans le cadre du CEN TC 251 commencent à porter leurs fruits.

Ainsi le standard HISA[3] [CEN ENV 12967 98] jette les fondements d'un "middleware applicatif" autour duquel peuvent venir s'articuler les applications utilisatrices de six services de base (Figure 1). Ceux-ci

---

[1] MDIS : Medical Diagnostic Imaging Support System : appel d'offres lancé en 1990 par le Département de la Défense américain pour l'équipement en PACS de plusieurs hôpitaux militaires

[2] AP-HP : Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

[3] HISA : Healthcare Information System Architecture

concernent (1) la gestion des patients, (2) la gestion de l'activité, (3) la gestion des données médicales, (4) la gestion des concepts, (5) la gestion des ressources, et (6) la gestion des autorisations. Parallèlement le standard EHCRA [CEN ENV 13606 99] définit des principes architecturaux pour l'échange de données médicales.

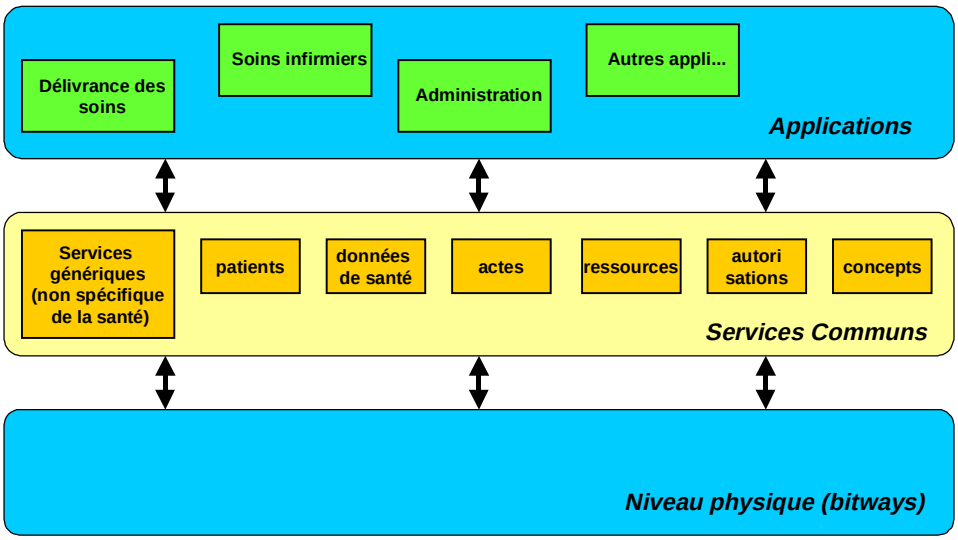


Figure 1. Services de base dans le cadre de l'architecture HISA

Cette nécessité de consensus autour de modèles de référence communs constitue un point fixe incontournable. Toutes les approches pragmatiques de l'intégration, aussi séduisantes soient elles, ont des performances limitées. Aussi l'effort doit-il être mené dans cette direction même si elle ne porte ses fruits qu'à long terme.

Dans le domaine de la gestion des images ce type d'approche a été utilisé à la fin des années 80 pour faciliter l'intégration SIR/PACS. Il s'agissait à la fois de faciliter l'interconnexion de systèmes existants et de guider les concepteurs dans la définition de nouveaux produits. Ces travaux sont connus sous le nom de "modèle de Marburg" [Greinacher 88, Herbst 88]. Il s'agissait de modéliser en détail les fonctions assurées par le SIR et le PACS ainsi que les informations échangées. Ces travaux ont fortement inspiré le comité ACR-NEMA lorsque celui-ci a défini des classes de services dédiées à la gestion des informations concernant les patients et les études: Patient management service class, study management service class [Acr-Nema 93].

Conception d'un système intégré

En ce qui concerne la conception de SI intégrés, les approches possibles dépendent avant tout des stratégies des acteurs industriels du domaine. En théorie tout est possible, depuis une offre très globale et très intégrée de la part d'un même fournisseur jusqu'à une offre très fragmentée, à partir de laquelle un intégrateur peut composer un système, cet intégrateur pouvant être une société de service, ou l'entreprise de santé elle-même, qui choisit dans chaque secteur applicatif le sous-système qui lui paraît le meilleur du marché (concept "Best of Breed" [Veazie 98]). Les facteurs principaux pilotant ces choix sont : les compétences du constructeur dans les différents "métiers" couverts par son produit, la confiance du client dans les compétences du fournisseur, la capacité du client à assumer les tâches d'intégration [Winsten 96].

Les réflexions suivantes peuvent être faites :

- sur le plan technologique, les technologies capables de permettre l'assemblage de composants sont de plus en plus crédibles, qu'il s'agisse d'architectures d'objets distribués de type CORBA[4], ou de solutions issues de l'internet (Java RMI, Java Beans) [Veazie 98, Nicolas 97] ;

[4] CORBA : Common Object Request Broker Architecture

- l'intégration de composants de faible granularité demeure d'autant plus risquée qu'il n'existe pas aujourd'hui de modèle de référence suffisamment détaillé sur lequel on puisse s'appuyer pour fonder un assemblage cohérent des composants d'un SIH intégré ;
- la composition de système intégrés complexes à partir de composants hétérogènes multiples (qui n'ont pas été prévus au départ pour inter-fonctionner entre eux) est encore problématique. En effet il n'existe pas aujourd'hui de technologie de modélisation ni de cadre d'analyse bien formalisé pour prédire l'interopérabilité de composants hétérogènes. Sur ce plan, des travaux intéressants existent pour essayer de mieux formaliser d'un part la demande - c'est-à-dire les caractéristiques fonctionnelles des composants recherchés - et d'autre part les interactions entre les composants déjà développés et leur environnement [Cohen 95, Cohen 97, Boxer 98].

2.1.2.5. Les solutions pragmatiques pour l'intégration

On désigne sous le terme de solutions pragmatiques celles qui prennent acte du fait qu'il n'existe pas de modèle général et consensuel pour spécifier l'architecture globale du SI et l'articulation de ses composants et qu'il faut donc s'accommoder d'une situation dans laquelle les produits sont fondés sur des modèles incohérents entre eux. Différentes approches d'intégration sont possibles, que nous allons décrire et discuter dans les paragraphes qui suivent :

1. Intégration "ad-hoc"
2. Intégration au moyen d'un "middleware applicatif"
3. Intégration "légère" au niveau du poste de travail

Ces approches ne sont pas incompatibles entre elles ; ceci signifie que dans une situation concrète on peut être amené à les utiliser conjointement. Leur présentation est illustrée à l'aide d'un exemple : celui-ci fait l'hypothèse d'un système déployé sous la forme de plusieurs sous-systèmes faiblement couplés entre eux (par exemple un SIR, un PACS, et un SIUS). On suppose que chacun a été conçu à partir d'un modèle propre de sorte que les mêmes informations peuvent exister dans plusieurs de ces sous-systèmes, sans cohérence particulière ni au niveau de la structure de l'information (modèle de données sous-jacent), ni au niveau de son contenu (systèmes de codage). Chaque sous-système détient sa propre base d'informations, qui peuvent être traitées ou consultées à partir des postes de travail placés sous son contrôle, selon des règles et une logique propres.

Parmi les trois approches proposées, les deux premières opèrent essentiellement au niveau des sous-systèmes alors que la dernière agit à la fois sur les sous-systèmes et les postes de travail placés sous la responsabilité des sous-systèmes.

Intégration "ad-hoc"

Principe

Cette solution est celle la plus communément utilisée. Elle consiste à modifier les sous-systèmes existants pour permettre la communication des données entre les sous-systèmes à intégrer. Elle correspond approximativement à ce que Covvey appelle "transactional integration" [Covvey 99]. Pour des raisons industrielles elle consiste presque toujours à insérer un composant d'interface (interface engine) plutôt que d'intervenir directement dans les composants logiciels existants (Figure 2). C'est par exemple l'approche qui avait été proposée dans le cadre des travaux sur l'interfaçage SIH/SIR/PACS au cours du projet AIM EurIPACS (concept de HIPIN box [Martens 93]). Cette approche est qualifiée de "ad-hoc" dans la mesure où le composant d'interface vise à la résolution d'un problème d'intégration limité. Selon les cas le composant inséré peut être très spécifique (développement spécifique au niveau d'un site particulier) ou au contraire donner lieu à de véritables produits industriels. C'est le cas du "PACS Broker" développé par la société MITRA qui est utilisé dans le cadre de nombreux systèmes PACS de nature industrielle (installé sur 500 sites à travers le monde) [Mitra 99].

Cette approche n'est pas antinomique de l'utilisation de standards. En effet en pratique des problèmes d'intégration similaires se posent au niveau de tous les sites cliniques. Ceci amène donc petit à petit les industriels à se concerter pour définir des standards d'échange de données. C'est ainsi qu'un standard comme

HL7[5] a été développé, de façon pragmatique, message par message. Ce standard est maintenant bien accepté et utilisé dans les composants d'interface, mais également de plus en plus de façon native dans le cadre des sous-systèmes.

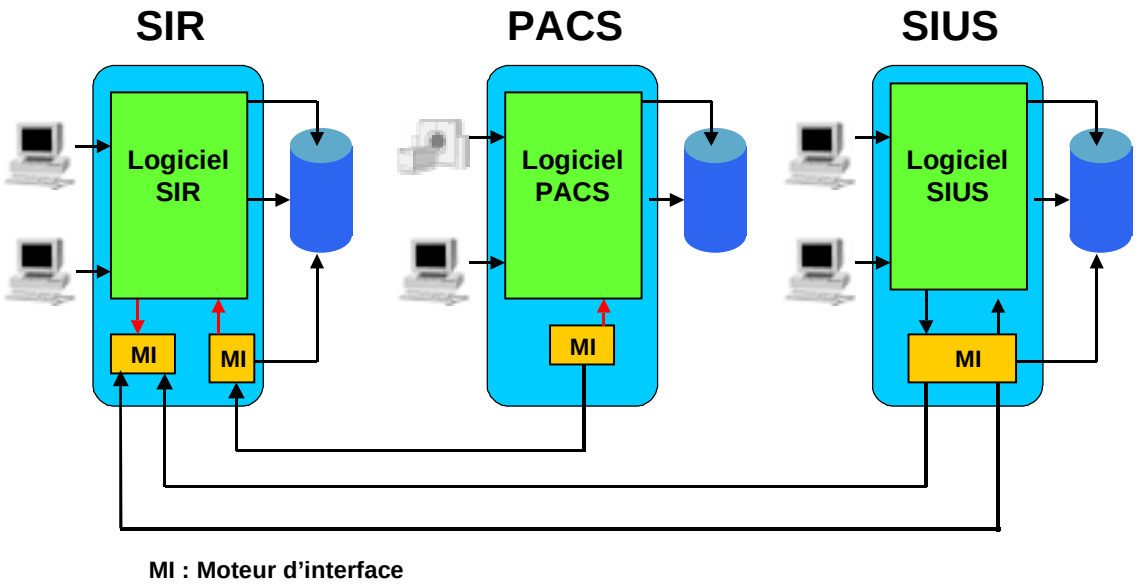


Figure 2. Intégration "ad-hoc", fondée sur l'utilisation de composants d'interface

Avantages

- Elle permet la réutilisation ponctuelle, mais efficace des données.
- C'est la seule approche réellement utilisable aujourd'hui sur le plan industriel.
- Enfin, l'expérience acquise par les industriels avec cette approche de l'intégration les conduit naturellement à définir des standards d'échange (comme le standard HL7).

Inconvénients

- Elle ne réduit pas la redondance, et n'améliore la cohérence que sur des aspects très ciblés : en effet l'introduction d'adaptateurs permet de réaliser une "traduction" des informations entre les dialectes locaux propres aux sous-systèmes à intégrer, mais ne contribue nullement à la définition d'une sémantique commune des informations au niveau du système tout entier.
- Elle est rigide et peu extensible (scalability), chaque problème d'intégration étant résolu au cas par cas.
- Elle est fragile car elle ne s'appuie pas sur un fondement formel solide : ainsi on peut être amené à modifier (restreindre ou au contraire élargir) la sémantique associée à certaines informations gérées par un sous-système pour des besoins de cohérence avec les autres sous-systèmes, ce qui peut avoir des conséquences inattendues.
- Les solutions qu'elle permet de mettre en œuvre sont difficiles à maintenir, et cette maintenance doit être assumée en interne ; l'existence de composants d'adaptation peut empêcher le passage aux versions logicielles ultérieures des sous-systèmes et donc compromettre l'évolutivité du système dans son ensemble.

Discussion

[5] HL7 : Health Level 7 : Association de constructeurs dans le domaine de l'informatique hospitalière, ayant développé un standard d'échange d'informations par messages (standard HL7) ; http://www.hl7.org

Les inconvénients de ce type d'approche peuvent être significativement réduits lorsque l'on s'appuie sur des standards pour l'interconnection des sous-systèmes. Les solutions proposées sont alors plus pérennes et moins coûteuses (création d'un véritable marché pour ces composants d'interfaces). Ceci dit les standards conçus selon ce type d'approche souffrent inévitablement d'un manque de cohérence interne. C'est le cas du standard HL7 qui fait actuellement l'objet d'une refonte complète (passage de la version 2.3 actuelle à la version 3.). Il s'agit de redéfinir l'ensemble des messages en s'appuyant sur un modèle global et cohérent de l'ensemble des informations échangées (Reference Information Model).

L'intégration SIH/SIR/PACS peut être aujourd'hui envisagée avec ce type d'approche (par exemple [Kinsey 00]). Au delà du succès des composants d'interfaces de type PACS Broker, on assiste aujourd'hui à un effort d'harmonisation inter-domaine : c'est le sens du projet IHE (Integrating the Healthcare Enterprise) lancé conjointement par le HIMSS (Healthcare Information and Management Systems Society) et la RSNA (Radiological Society of North America). Cette initiative consiste à organiser des démonstrations destinées à prouver à la communauté des SIH et des PACS que des standards conçus indépendamment comme HL7 et DICOM peuvent permettre, pour peu que l'on prenne quelques précautions lors de leur mise en œuvre, de réaliser des systèmes capables d'inter-fonctionner de façon harmonieuse.

En fait, et même si les promoteurs de IHE eux-mêmes s'en défendent, le projet IHE réalise un travail d'architecture puisqu'il amène les industriels à établir un consensus sur :

- des entités fonctionnelles, limitées il est vrai à celles impliquées dans des échanges pour lesquels une interopérabilité entre produits est recherchée,
- des flux d'informations entre ces entités fonctionnelles pour la réalisation de fonctions précises,
- une sémantique précise des éléments échangés, ce qui amène le cas échéant à restreindre le champ d'utilisation des standards utilisés (DICOM et HL7) pour garantir l'interopérabilité (définition de profils d'utilisation).

Nous rangeons toutefois les approches de type IHE dans la catégorie des approches d'intégration "ad-hoc" car les modifications apportées restent mineures et s'appliquent à des produits existants.

Intégration au moyen d'un "middleware applicatif"

Principe

Le concept de "middleware" est apparu au milieu des années 90 et désigne des services destinés à faciliter l'intégration des applications au sein des systèmes d'information [Toussaint 97]. Ces services "intermédiaires" s'interposent entre les applications (application layer) et les outils de communication et de stockage des données (bitways layer). Une démarche d'intégration fondée sur l'utilisation d'un middleware consiste donc à modifier les produits existants pour permettre leur inter-fonctionnement via une plateforme d'intégration, qui peut être spécifique de l'application médicale ou non (Figure 3). Par exemple, il peut s'agir d'un cœur de SIH offrant des services de bases utilisables par de nombreuses applications clientes (par exemple Service "Patient", permettant l'identification et la gestion des mouvements des patients, ou Service "Données médicales", permettant un accès à l'ensemble des informations cliniques des patients de l'hôpital). Ceci présente le double avantage d'une part de réduire la redondance et donc d'augmenter l'efficacité globale, et d'autre part d'augmenter la cohérence, facteur de qualité de l'information. L'insertion d'un middleware applicatif est toujours une opération lourde, mais très structurante [Grimson 98].

Par exemple, la mise en œuvre d'un service terminologique consiste à instaurer un langage commun au niveau de l'entreprise, et relève tout à fait de ce type d'approche [Ingenerf 99, Rossi Mori 98]. En fait il ne s'agit pas d'éliminer totalement l'hétérogénéité au niveau de la structure et du codage des informations mais de garantir l'interopérabilité sémantique entre les différents sous-systèmes, en particulier grâce à l'utilisation de systèmes terminologiques fondés sur des représentations conceptuelles (par exemple GALEN [Rector 98]).

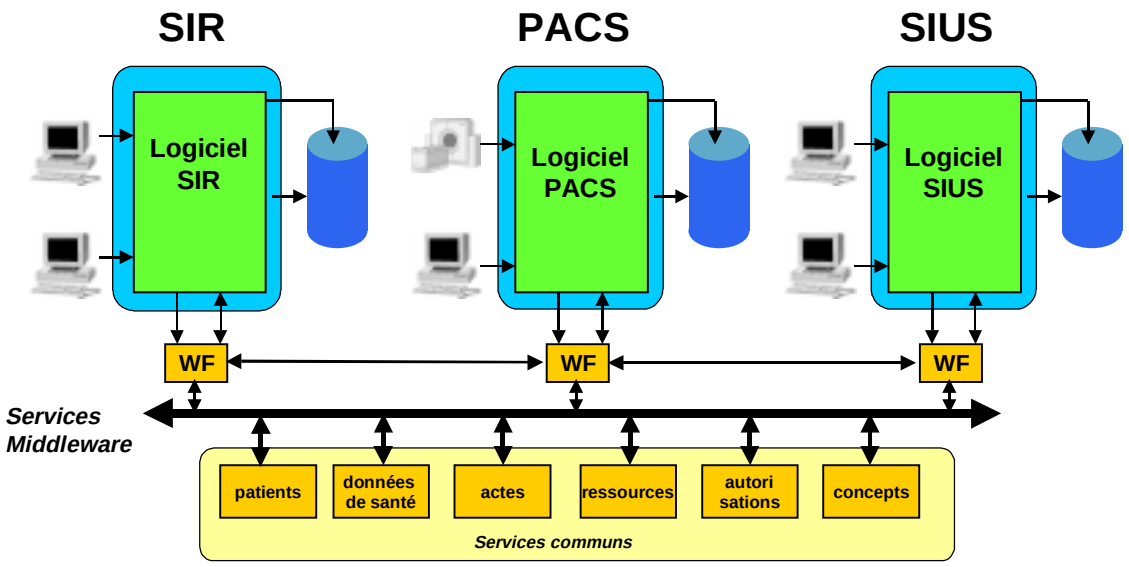


Figure 3. Intégration fondée dur l'utilisation d'un "middleware applicatif"

La plateforme d'intégration peut aussi être non spécifique de l'application médicale ; il peut s'agir par exemple d'un gestionnaire de workflow, capable de prendre en charge le contrôle de l'activation des tâches de traitement d'information selon des règles ou des procédures bien définies, ainsi que la gestion des informations créées ou utilisées dans le cadre de ces tâches. Le WfMC[6] (Workflow Management Coalition) a développé depuis 1993 tout un ensemble de concepts, de standards et d'API (Application Program Interface) pour le fonctionnement et l'interopérabilité de systèmes de Workflow [WfMC 98]. De ce fait cette approche s'applique à la fois à l'intégration verticale (interne à un sous-système) et à l'intégration horizontale (entre sous-systèmes). L'utilisation des concepts et du formalisme du workflow en radiologie a été proposé par Wendler depuis plusieurs années [Meetz 99]. A vrai dire de nombreux auteurs utilisent ce terme de façon un peu abusive en l'appliquant à toute démarche d'analyse structurée de l'activité.

Avantages

- Cette approche permet de réduire la redondance, et améliore la cohérence des informations entre les différents sous-systèmes.
- Il s'agit d'une approche extensible dans la mesure où les services du middleware peuvent être progressivement utilisés par l'ensemble des sous-systèmes existants ou qui seront mis en place par la suite.
- Elle permet progressivement de replacer le "client" principal (à savoir le patient) au centre du système et donc de remédier à l'éclatement auquel a conduit une approche de conception privilégiant la production de soins dans des cadres limités (plateaux techniques, unités de soins, etc.). Ce recentrage est présenté par de très nombreux auteurs comme indispensable pour atteindre certains des objectifs de l'intégration cités précédemment [Young 97].
- L'approche workflow permet de respecter l'architecture et les développements déjà réalisés (legacy systems) en se focalisant sur l'activation et l'acheminement de données et non sur les traitements à réaliser eux-mêmes.

Inconvénients

- Cette approche est d'un coût élevé car elle suppose la modification (même mineure comme on l'a souligné) des sous-systèmes existants ou le développement d'adaptateurs pour l'ensemble des applications que l'on souhaite intégrer. Le développement de ces adaptateurs ne se limite pas à l'utilisation des mécanismes d'activation de processus ou d'échange de données propres à la plateforme d'intégration choisie mais

[6] WfMC : http://www.aiim.org/wfmc

suppose une véritable "traduction" des informations entre le dialecte local et spécifique à un sous-système et le langage commun à l'ensemble du système. Cette traduction concerne à la fois les aspects syntaxiques et sémantiques ; elle est d'autant plus complexe à réaliser que les modèles d'informations implémentés au sein des différents sous-systèmes sont divergents.

Discussion

L'adoption d'un modèle d'architecture et d'un modèle commun des données constitue un préalable à toute démarche d'intégration fondée sur l'utilisation d'un middleware applicatif. Il faut noter toutefois que ce modèle commun peut ne concerner qu'un sous-ensemble des informations gérées par les sous-systèmes, à savoir celles qu'il est le plus important de partager entre toutes les applications. Un modèle comme celui de la prénorme HISA, s'il a fait progresser la réflexion sur ces aspects architecturaux n'est pas exempt de critiques. Par exemple les services définis dans le cadre de HISA peuvent apparaître de granularité trop faible, ce qui oblige les applications à effectuer de multiples requêtes et augmente donc les temps de réponse des applications. Par ailleurs identifier un service commun "données médicales" pour permettre un accès unifié au dossier du patient est intellectuellement séduisant mais s'avère très éloigné du mode de fonctionnement actuel où ces données sont gérées au niveau application dans le cadre de chaque sous-système. Enfin, même si HISA dit explicitement que chacun des six services de base peut être fourni par une entité logique ou physique différente, l'interprétation qui en est faite tend à promouvoir une notion de cœur de SIH relativement monolithique, dont certains contestent le bien fondé [Reynolds 00].

Intégration "légère" au niveau du poste de travail

Principe

Cette solution consiste à réaliser l'intégration non pas au niveau des sous-systèmes d'information mais au niveau des postes de travail des utilisateurs, en facilitant l'accès aux informations détenues par les différents sous-systèmes. Ce type de solution est facile à déployer dans le contexte du développement des technologies intranet/internet. En effet il suffit de doter les différents sous-systèmes de serveurs de données HTTP/HTML. Les informations gérées par ces sous-systèmes deviennent alors facilement consultables au niveau de l'ensemble des postes de travail du réseau intranet/internet à partir d'un simple navigateur (Figure 4). Il faut souligner toutefois que dans ce type de solution l'utilisateur joue un rôle clé, puisque c'est lui qui, en définitive, réalise l'intégration. Par exemple, lors de la rédaction d'une demande d'examen, c'est l'utilisateur qui décide lui-même de se connecter au serveur de résultats de l'hôpital pour s'assurer que le même examen n'a pas été déjà réalisé.

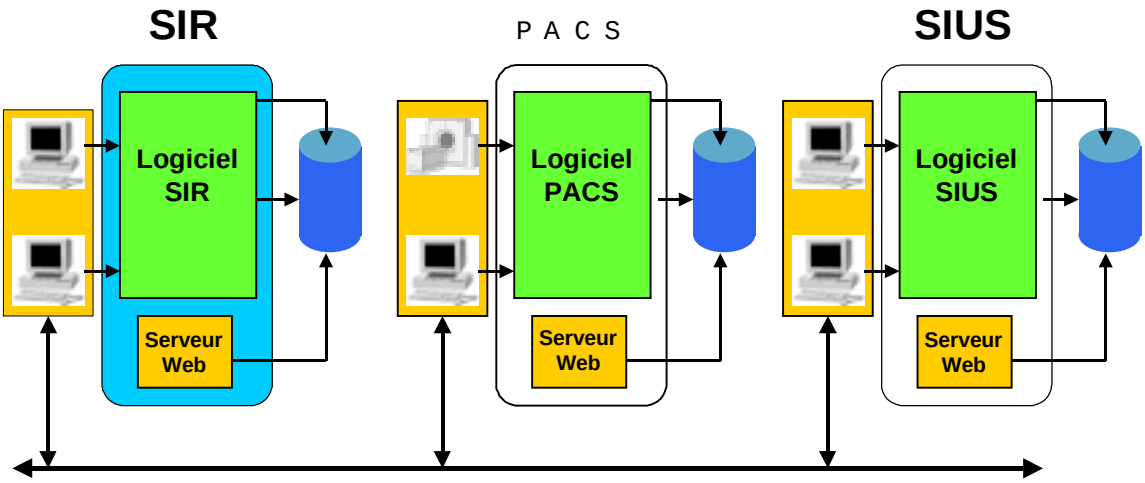


Figure 4. Intégration "légère" au niveau du poste de travail

Avantages

- Il s'agit d'une solution peu coûteuse et facile à mettre en œuvre. La notion de portail d'accès permet d'offrir à l'utilisateur une vision intégrée des services offerts. Ceci demande bien entendu des développements supplémentaires car cette fonction n'était offerte par aucun des sous-systèmes existants.
- Elle est très flexible, c'est à dire qu'elle a la capacité de rendre des services potentiellement importants aux utilisateurs, même dans des situations peu fréquentes qui ne justifient donc pas une organisation et des mécanismes dédiés de consultation/récupération d'informations.

Inconvénients

- Cette approche de l'intégration n'introduit en fait aucune interopérabilité entre les sous-systèmes et ne va donc pas dans le sens d'une automatisation des processus de traitement d'information. C'est l'utilisateur et lui seul qui traite l'information. La réutilisation de l'information se limite au "couper/coller" de données non structurées (textes, images, etc.), opération réalisée sous l'entière responsabilité de l'utilisateur, c'est à dire sans aucune forme de contrôle de cohérence de la part du système. En fait les limitations de ce type de solution proviennent davantage du caractère non structuré de l'information, plutôt que de l'archaïsme de la procédure de "copier/coller" elle-même ; en effet il paraît bien illusoire de croire qu'on puisse se passer d'une intervention humaine pour sélectionner parmi l'information disponible celle qui est véritablement pertinente dans un contexte donné.
- Ce type de solution pose par ailleurs le problème de la confiance que l'utilisateur peut accorder à des données cliniques "récupérées" au fil d'une recherche plus ou moins structurée. Il est souhaitable qu'un minimum de conventions existent entre les utilisateurs et les différents services quant à l'utilisation des données accessibles sur ces serveurs (disponibilité, complétude, etc.).

Discussion

Cette approche est certainement celle qui donne le plus de possibilités nouvelles aux utilisateurs, au moindre coût. En particulier elle permet à l'utilisateur de faire converger sur un même écran les composantes textuelle et image des données médicales, forme d'intégration à forte valeur ajoutée qui est aujourd'hui très mal couverte par les autres approches d'intégration. Il faut toutefois rappeler que ces technologies ne supportent que l'accès aux données et non leur gestion. Donc en ce qui concerne les images, le problème de la gestion de leur disponibilité demeure entier et doit être résolu avec les méthodes et outils traditionnels. Enfin la notion de portail d'accès, même si elle demande des développements supplémentaires apporte également une réelle valeur ajoutée.

2.1.2.6. Comparaison et synthèse

Les différentes approches que l'on vient de présenter brièvement ont donc chacune leurs avantages et leurs limitations, résumées dans le Tableau 2 : la première et la troisième sont très complémentaires et efficaces à court terme, la première bien adaptée à l'automatisation du workflow, la troisième répondant à un souci pour l'utilisateur d'accéder de façon souple à l'information, où qu'elle soit et sans que le contexte de l'accès ait besoin d'être bien identifié a priori (flexibilité). On voit également les limites de ces approches qui ne vont pas (ou très lentement) vers une convergence des modèles et des architectures, point fixe autour duquel s'articule toute interopérabilité réelle.

La seconde approche relève d'une philosophie où ces modèles et ces architectures de référence constituent des prérequis. Par ailleurs un facteur à prendre en compte est bien entendu la préservation des investissements ; ceci concerne à la fois les fournisseurs qui ont investi des sommes substantielles dans la conception des produits disponibles aujourd'hui et les entreprises de santé déjà engagées dans le déploiement d'un SIH.

Type d'approche	Standards nécessaires	Automatisation des traitements d'information	Flexibilité pour les utilisateurs	Préservation des systèmes existants	Maturité des technologies mises en jeu
"Ad-hoc" (composants d'interface)	messages (e.g. HL7)	***	0	***	***
"Middleware"	-architecture de référence - architecture d'objets distribués	**	**	*	*
Intégration légère (web servers)	HTML/HTTP	0	***	**	***

Tableau 2 : comparaison de différentes approches d'intégration

Enfin le développement rapide du standard XML[7] [Michard 99] et des standards associés (tels que XSL[8], Xpointer, Xlink, etc.) ouvre des perspectives très importantes que nous évoquerons plus en détail dans la section "perspectives". En effet XML, en permettant de véhiculer la structure sémantique du document en même temps - mais de façon séparée - de son contenu ouvre la porte à des échanges qui ne se limitent plus à un dialogue de serveur à utilisateur humain, mais introduit des possibilités nouvelles en matière de traitement automatisé du côté de l'application "cliente" (par exemple présentation des données adaptée au contexte de travail, réutilisation de l'information, contrôle de cohérence, etc.). Bien entendu le problème de la définition de la structure des documents et des entités conceptuelles sous-jacentes reste entier, mais l'originalité d'XML est précisément de proposer un chemin de migration souple pour passer du texte non structuré que l'on connaît aujourd'hui avec HTML, à l'utilisation de modèles de contenu potentiellement multiples et de complexités variées, découlant des consensus sémantiques qu'on a pu atteindre au sein des différentes communautés et organisations amenées à partager l'information (sous-systèmes du SIH, SIH global, autres communautés).

Ces nouvelles potentialités, amplifiées par leur probable utilisation à grande échelle dans le cadre du commerce électronique, ont d'ores et déjà été reconnues par les organismes de standardisation dans le domaine de la santé : HL7 a décidé d'intégrer XML dans sa stratégie pour la version 3. du standard et parallèlement le CEN TC 251 a également manifesté son intention d'utiliser largement ce standard dans le cadre des communication par messages [CEN-HL7 agreement 00].

[7] XML : eXtensible Markup Language

[8] XSL : eXtensible Style Language

2.2. Contributions au domaine

Nous avons apporté depuis 1983 différentes contributions au domaine discuté précédemment (interopérabilité entre les équipements d'imagerie au sein de systèmes d'information intégrés). Celles-ci sont résumées dans les paragraphes qui suivent et ont été apportées dans le cadre de différents projets nationaux et internationaux :

(1) le projet SIRENE, projet pilote national mené entre 1983 et 1990,

(2) le projet européen EurIPACS/MIMOSA[9], et enfin

(3) dans le cadre de la standardisation européenne (CEN TC251).

2.2.1. Le projet SIRENE

2.2.1.1. Motivations, objectifs et méthodes

Motivations et genèse du projet

L'initiative du lancement en 1982 d'un projet PACS à Rennes revient à Jean-Marie Scarabin, alors responsable du Groupe GBM SIM[10]. Ce laboratoire de recherche s'intéressait déjà à cette époque à différents aspects du traitement des signaux et des images en particulier dans le domaine de la neurochirurgie, domaine dans lequel la confrontation entre images de modalités différentes et la référence à des modèles de connaissances jouent un rôle important. Dans ce contexte, le PACS apparaissait comme une infrastructure de communication et de gestion de l'information (images, signaux et, à terme, dossier médical) indispensable pour le développement de procédures assistées par ordinateur pour le diagnostic et la préparation de gestes chirurgicaux.

Au delà de cet intérêt en relation directe avec notre domaine de recherche, les perspectives ouvertes par les PACS aux niveaux médical, économique et industriel nous paraissaient très prometteuses ; les comptes-rendus des deux premiers congrès PACS I et PACS II de 1982 et 1983 ont conforté notre enthousiasme pour cette discipline en plein développement. Enfin, le site Rennais disposait de toutes compétences nécessaires à un tel projet, au niveau de centres de recherche comme le CCETT[11], le CELAR[12] ou d'écoles d'ingénieur comme l'ESE[13]. Ce contexte favorable a permis la rédaction d'un document de définition de projet en juin 1983 [Scarabin 83]. Le projet, doté de financements de l'Etat et du Conseil Régional de Bretagne a été mené sous l'autorité du CHR avec une direction technique du projet confiée au CCETT.

Objectifs

L'objectif ultime était très ambitieux puisqu'il s'agissait, à terme, de connecter l'ensemble des sources d'images numériques de l'hôpital à un réseau local de façon à permettre l'archivage des images au sein d'un serveur central de grande capacité et d'offrir l'accès à ces images à partir d'une gamme de terminaux répartis dans l'hôpital (Figure 5). Le projet avait pour but la réalisation d'un prototype et l'évaluation des impacts médicaux et économiques d'un tel système. Le projet devait être mené en partenariat étroit avec des industriels pour permettre une industrialisation partielle ou totale des développements. L'approche choisie était du type "pilotée par la technologie" puisqu'il s'agissait avant tout de mettre en place une infrastructure de communication et d'archivage d'images ; en outre l'idée était de s'appuyer sur des composants de haute technologie, les seuls capables à nos yeux d'offrir les performances nécessaires et de garantir une certaine pérennité dans le temps. Ces composants étaient les suivants :

---

[9] MIMOSA : Medical Image Management in an Open System Architecture

[10] GBM-SIM : Groupe de recherche en Génie Biologique et Médical "Signaux et Images en Médecine"

[11] CCETT : Centre Commun d'études de télédiffusion et Télécommunications

[12] CELAR : Centre d'électronique de l'armement

13 ESE : Ecole Supérieure d'électricité

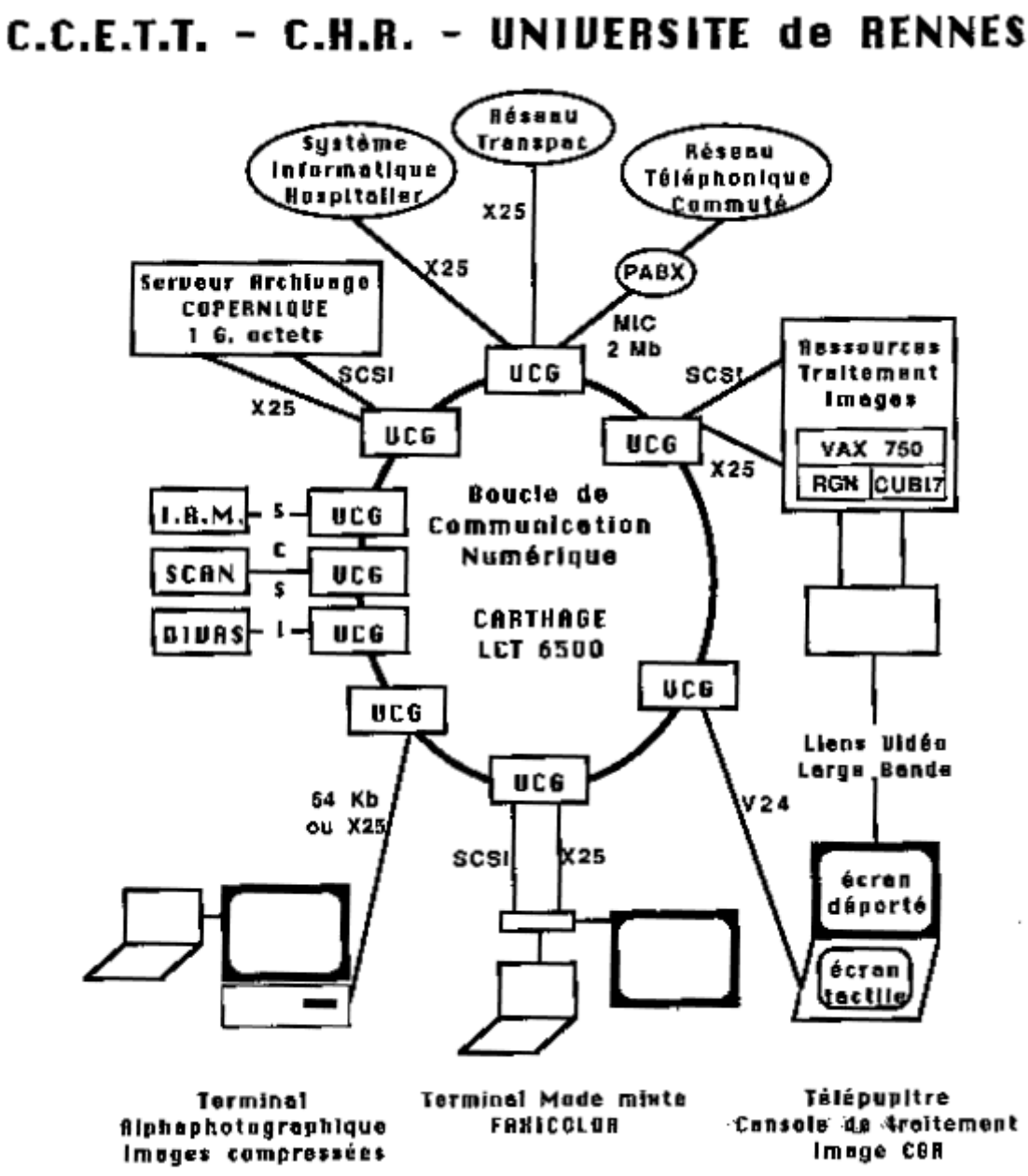


Figure 5. Architecture générale du PACS SIRENE

i. Le *réseau Carthage*, industrialisé par le LCT[14], à partir de développements prototypes réalisés au CCETT apparaissait comme une première génération de réseaux multi-service (voix/données) : anneau à jeton sur fibre optique imaginé dans l'environnement des télécommunications, Carthage constituait un réseau ouvert doté d'interfaces normalisés et ouvert sur les réseaux publics.

ii. Le *serveur multimédia*, proposé par la société *Copernique* intégrait la gestion d'images dans un système de gestion de bases de données (SGBD) supportant les modèles relationnel et navigationnel ; l'architecture multi-processeur offrait des garanties intéressantes en termes de débit d'entrée/sortie, paramètre qui était alors perçu comme critique pour rendre possible le transfert des images "en temps réel", et permettre une montée en charge du PACS sans diminution sensible des performances. La société Copernique avait déjà une solide expérience de serveurs de haute capacité puisque cette société avait été retenue par l'administration des télécommunications pour réaliser les serveurs annuaires de l'annuaire électronique.

[14] LCT : Laboratoire Central des Télécommunications

iii. En ce qui concerne les terminaux de consultation, l'approche choisie distinguait trois types de terminaux répondant à des besoins différents :

- une station de hautes performances, destinée aux radiologues et aux cliniciens spécialisés (par exemple neurochirurgie, radiothérapie) et dotée de fonctionnalités de traitement d'images ;

- une station de travail permettant d'intégrer l'image dans une gestion de dossier médical : l'idée de base était que la même mémoire d'écran peut être utilisée pour visualiser différents éléments qui composent un dossier (textes, codés ou représentés en fac-simile, graphiques, images, etc.) ; l'objectif consistait donc à gérer ces types de documents au sein d'un dossier structuré ;

- enfin, des terminaux de consultation, voués à une diffusion importante dans l'hôpital et envisagés au départ comme de simples écrans d'affichage d'images, sans ressources de manipulation et de traitement.

2.2.1.2. Résultats

Mise en place générale du PACS

Le déroulement du projet a vu deux phases : (1) une phase de spécification générale du système (de janvier à l'été 85), et (2) une phase de réalisation et d'intégration (de septembre 85 à novembre 89).

Spécifications

Cette phase de spécification a connu une première période au cours de laquelle les médecins ont été chargés d'expliciter les fonctionnalités souhaitées en matière d'accès aux images, d'affichage, et de traitement d'images. Le souci de permettre un inter-fonctionnement avec le système d'information de l'hôpital (SIH) a été présent dès le début du projet. Ainsi le développement du PACS devait-il s'intégrer dans les projets d'informatisation inscrits au schéma directeur comme le développement d'une application Fichier Central des Patients ou l'informatisation des unités de soins. Ces efforts n'ont pas aboutis, d'une part du fait de la complexité des problèmes abordés, et d'autre part de l'immaturité de la communauté dans son ensemble.

Une seconde période a vu se dessiner les grandes options techniques du système. En ce qui concerne le réseau, les interfaces disponibles sur le réseau Carthage ne permettaient pas de transfert de données à un débit supérieur à 64 Kbits/s, débit très insuffisant pour la transmission des images au sein d'un PACS. Il fut donc décidé de doter le réseau d'un interface rapide, sous la forme d'une greffe matérielle et logicielle ; l'interface choisi fut SCSI (Small Computer System Interface), en raison de ses performances et de sa diffusion croissante sur les mini-ordinateurs et les sources d'images. Deux types de canaux de communication furent donc considérés : des canaux à bas débit (64 Kbits/s) pour la gestion des protocoles, et des canaux à haut débit (de l'ordre de 1 Mbit/s), dédiés à la transmission des images.

Sur le plan logiciel, il fut choisi d'implanter sur le serveur central une *application de consultation*, basée sur des menus arborescents, permettant la navigation dans la base de données pour la sélection de données relatives aux patients, aux examens et aux images. Cette application dialoguait avec les terminaux par le biais d'écrans (VT100 ou vidéotex) mis en forme par une méthode d'accès SATURNE, développée au sein du CCETT pour des applications de vidéographie. Une *application d'archivage* fut également conçue sur la base d'un protocole spécifique permettant la création des entités patient, examen, acquisition, image dans le serveur central. Un protocole de *transfert de fichiers*, inspiré du standard FTAM (File Transfer Access and Management), fut défini pour contrôler les opérations de transfert d'images.

Les choix définitifs en matière de terminaux n'ont été arrêtés que plus tard. Pour la station de travail de hautes performances, le choix s'est finalement porté sur un processeur d'images de Thomson-CGR (Compagnie Générale de Radiologie), société qui souhaitait à cette époque homogénéiser les plates-formes matérielles utilisées dans ses équipements d'imagerie. Pour le terminal de milieu de gamme Faxicolor, un cahier des charges fut rédigé en 1986 et un accord fut passé entre le CCETT et l'ESE pour réaliser les développements. Enfin, après un premier choix porté sur le Graph16, terminal de vidéographie supportant le vidéotex alphaphotographique, une nouvelle orientation s'imposa à partir de 1987, visant à réaliser un terminal de consultation sur PC. L'approche choisie a consisté à s'appuyer sur un logiciel de gestion de cabinet médical, qu'il s'agissait d'enrichir pour le doter de capacités d'affichage d'images et de communication avec le serveur central.

Phase de réalisation et d'intégration

Le prototype a été réalisé dans les locaux du CCETT entre 1985 et mi-1988 [Renoulin 87], donnant lieu à une recette partielle des principales composantes du système en avril 1988. La phase d'intégration en site hospitalier

a été beaucoup plus longue que prévu : l'élément le plus difficile à intégrer a été la chaîne de communication SCSI - d'une grande complexité puisqu'elle mettait en jeu des développements spécifiques sur l'ensemble des composants du système. Le scanner X (CE10000, Thomson-CGR) fut la seule source d'images effectivement connectée, au moyen d'une passerelle émulant un dérouleur de bandes magnétiques. L'application d'archivage fut également implantée sur le calculateur hôte de la station de traitement d'images (VAX 750, DEC) de façon à permettre l'archivage des examens IRM et angiographiques. Cette phase d'intégration ne s'est effectivement achevée qu'à la fin de l'année 1989 avec la recette du prototype par le CHR [Gibaud 89a].

Des développements complémentaires ont été réalisés en 1989. Devant le peu de souplesse et d'évolutivité de l'application de consultation, nous avons recherché le moyen de développer des applications distribuées autonomes, capables d'accéder aux données stockées dans le serveur central. La solution que nous avons mise en œuvre s'appuyait sur trois éléments : (1) l'implantation d'une application de consultation au sein de la station de travail (de type PC), (2) l'utilisation de logiciels d'accès au SGBD distant (fournis par Copernique) selon une architecture client / serveur, et (3) l'utilisation d'un SGBD local simplifiant à la fois la gestion des données locales et l'écriture des applications (générateur d'applications et de formulaires). Cette solution a été mise en œuvre pour faciliter la récupération d'images sur une station de travail utilisée pour la préparation des explorations stéréotaxiques [Gibaud 90].

Mise en place d'une infrastructure de traitement d'images

Un des résultats importants du projet a été la mise en place d'une infrastructure de traitement d'images 2D et 3D, connectée au réseau SIRENE, et capable de supporter des applications cliniques dans le domaine de l'imagerie multimodalité 3D. L'élément central de cet infrastructure était un VAX 750 (Digital Equipment Corporation), associé à deux processeurs spécialisés :

- le processeur d'images RGN (Thomson-CGR), couplé à un pupitre à écran tactile,
- une machine de synthèse d'images 3D (Cubi 7, puis Cubi 9000, Telmat-Caption), capable de calculer rapidement des images à partir de scènes 3D composés de modèles polygonaux.

Cette infrastructure a été utilisée jusqu'en 1990 pour de nombreuses activités de recherche en traitement d'images 2D et 3D, et en particulier pour un projet de radiothérapie par mini-faisceaux, financé par l'ARC[15] (collaboration avec le Centre Régional de Lutte contre le Cancer).

2.2.1.3. Conclusion de la première phase du projet SIRENE (1983-1989)

Analyse des difficultés rencontrées

Quand on examine en détail l'expérience SIRENE [Gibaud 91, Gibaud 93a], force est de constater que la totalité des objectifs de départ n'ont pas pu être atteints : faible implantation en radiologie (une seule source d'images effectivement connectée), faible diffusion dans l'hôpital, pas de lien avec le SIH. Mais le point le plus critique est que des éléments technologiques comme le réseau et les terminaux se sont révélés obsolètes avant même que le système ait pu être mis en fonctionnement clinique en site. Ainsi la configuration du réseau Carthage, achetée en 1986, s'est révélée non-extensible en 1989, car d'une technologie considérée comme dépassée par le constructeur. Or, la spécificité induite par le réseau avait demandé un effort logiciel considérable aussi bien du côté du réseau (matériel et logiciel spécifiques), que du côté des stations de travail (drivers spécifiques, gestion de la dualité des canaux de communication), et du serveur Copernique (raccordement au bus inter-machine du serveur Copernique, accès spécifiques aux applications). Le terminal Faxicolor, bien que basé sur une idée toujours d'actualité de gestion de documents médicaux multimédia s'est également révélé être une impasse : en effet l'expérimentation de ce terminal n'a guère été possible faute d'une prise en compte réaliste de son environnement fonctionnel (quels documents ? pour communiquer avec qui ? moyens complémentaires de numérisation et de restitution des documents). Même impasse pour la station de travail développée autour du processeur d'images RGN et de son pupitre à écran tactile, pour des raisons de support industriel : en effet suite au rachat de Thomson-CGR par General Electric Medical Systems (GE) ces équipements n'ont plus bénéficié du support de cet industriel.

[15] ARC : Association de Recherche contre le Cancer

Sur le plan méthodologique nous avons certainement commis des erreurs à différents niveaux: (1) le besoin médical, mal perçu au départ, n'a pu être convenablement pris en compte que plus tard lors de l'insertion en milieu hospitalier ; (2) les options technologiques retenues ont conduit à un système insuffisamment modulaire, dont la complexité - souvent injustifiée - a été mal mesurée au départ, ce qui explique le retard de presque deux ans sur le planning initial avec toutes les conséquences que ce retard a entraîné en matière d'obsolescence matérielle ; enfin (3) nous avons certainement manqué de lucidité sur la motivation et les stratégies industrielles de certains de nos partenaires industriels (LCT, puis Matra, division Communications, CGR puis GE).

Ceci dit, on perçoit avec le recul d'une dizaine d'années combien cet échec a été ressenti de manière exagérément amère. En effet toutes les expériences pionnières menées à cette époque ont eu à faire face aux mêmes difficultés [Maguire 86] :

- difficultés d'ordre technologique, liées à l'immaturité de la technologie (chère, peu fiable, et globalement peu performante). L'absence de standards pour le raccordement des sources d'images a également nécessité des efforts importants pour mettre en œuvre des solutions spécifiques, sans aucune pérennité ;
- difficultés d'ordre méthodologique : les équipes n'étaient généralement pas préparées à mener des projets de cette ampleur. Les problèmes d'organisation et les aspects ergonomiques ont été notablement sous-estimés, conduisant à des systèmes difficilement utilisables dans un contexte clinique.

Aspects positifs

Malgré un retard important, le projet SIRENE a tout de même permis la mise en place d'un système opérationnel, utilisé sur le plan clinique pour la préparation de traitements en stéréotaxie et en radiothérapie. Dans un contexte plus "recherche", le système a fourni une infrastructure de communication et de gestion d'images utilisée quotidiennement pour l'étude, la mise en place et l'évaluation de méthodes de reconstruction 3D et de fusion de données modalité.

Par ailleurs, les activités PACS menées à Rennes entre 1983 et 1990 ont stimulé la réflexion au sein de l'hôpital et au sein des autres groupes français intéressés par les problèmes de gestion d'images. Ceci a amené en 1988 sur la création du groupe NRV-PACS associant les équipes de Yves Bizais (Projet DIMI à Nantes) et de R. Di Paola (INSERM U 66, Villejuif). Ce groupe a su construire à partir des expériences de chaque groupe une vision commune et originale de la gestion des images dans les PACS [Gibaud 89b, Bizais 91a, Bizais 91b, Aubry 91, Gibaud 93a, Gibaud 93b], vision que ce groupe a partagée pendant plusieurs années avec un industriel comme GE, ce qui a conduit en 1992 au lancement du projet EurIPACS/MIMOSA.

2.2.1.4. Poursuite du projet SIRENE (1990-1996)

A partir de 1990, une nouvelle orientation a été donnée au projet PACS SIRENE, toujours sous l'impulsion de Jean-Marie Scarabin et grâce à la mise en place du CERIUM[16]. Cette équipe d'ingénieurs, mise en place dans le cadre du Contrat de Plan Etat/Région a mené entre 1990 et 1996 différents projets dans les domaines de l'imagerie 3D multimodalité et des PACS. Cette nouvelle équipe a su tirer toutes les leçons de l'expérience précédente, tant sur le plan technique que sur le plan méthodologique et proposé de nouvelles orientations. Sur le plan technique le réseau Carthage/LCT 6500 a été remplacé par une technologie Ethernet conventionnelle (routeur CISCO), et les sources numériques d'images ont été progressivement connectées au réseau, au fur et à mesure de leur renouvellement. Le serveur Copernique a également été remplacé par un serveur SUN et sa fonction totalement reconsidérée. En effet nous avons réalisé alors que ni la technologie, ni la communauté des utilisateurs n'étaient mûrs pour l'abandon du film en tant que support principal d'archivage des images. Dans ces conditions, il n'était pas opportun de chercher à archiver sous forme numérique toutes les images produites, mais il était préférable de concentrer l'effort sur le pré-chargement des images vers les stations utilisatrices (fonction d'auto-routage). De même, l'option technique retenue durant la première phase de SIRENE et qui consistait à transformer toutes les images dans un format unique (format pivot) a été reconsidérée. Même si cette option est a priori la plus rationnelle, elle n'était pas à l'époque la plus efficace pour au moins deux raisons. D'abord les plateformes utilisatrices d'images utilisaient toutes des formats différents, et d'autre part les formats pivots disponibles alors ne permettaient pas de gérer correctement tous les paramètres nécessaires pour l'utilisation correcte des images (notamment pour les applications d'imagerie 3D ou de planning chirurgical assisté par ordinateur). Il fut donc choisi d'implémenter au niveau du serveur PACS une fonction de conversion de formats, capable de fournir les images selon les formats acceptés par les stations utilisatrices. Le serveur d'images développé par l'équipe du CERIUM a ensuite été progressivement remplacé par un système industriel composé

[16] CERIUM : Centre Européen de Recherche en Imagerie à Usage Médical

d'un serveur de stockage temporaire (OPAL, GE) et un gestionnaire d'images (TOPAZ, GE) - dérivé notamment des travaux de modélisation réalisés dans le cadre du projet Européen EurIPACS/MIMOSA (voir plus loin) [Gibaud 96a, Cordonnier 96, Gibaud 97].

2.2.2 La modélisation des systèmes de gestion d'images - le modèle MIMOSA

2.2.2.1. Contexte

Au delà des raisons techniques, organisationnelles et humaines susceptibles d'expliquer le relatif échec des expérimentations de PACS, notre analyse du problème au début des années 1990 était qu'une des raisons fondamentales était l'absence de consensus sur les fonctions que l'on attend d'un système de gestion d'images médicales (SGIM), et sur la nature des entités d'information qu'il est censé gérer. Cette absence de consensus s'explique par la multiplicité des spécialités médicales productrices ou utilisatrices d'images, par la variété des processus organisationnels propres à chaque institution ou à chaque pays, des différences de point de vue entre les fournisseurs des différents composants du système d'information (systèmes d'information administratifs, sources d'images, stations de travail, etc.).

Les hypothèses de base du projet européen EurIPACS/MIMOSA, mené entre 1992 et 1994 dans le cadre du Programme AIM (Advanced Informatics in Medicine) étaient alors les suivantes :

- il est possible de définir un modèle de système de gestion d'images (modélisant les fonctions du système et les données qu'il traite ou qu'il produit), d'une façon qui est largement indépendante : i) des spécialités médicales, ii) des modalités d'imagerie, iii) des technologies utilisées pour le stockage et la communication des informations ;
- ce modèle permet de réaliser des systèmes génériques, qu'on peut ensuite compléter et adapter (customisation) pour tenir compte des caractères spécifiques propres à chaque institution ou spécialité médicale ; la souche commune obtenue permet d'une part la réutilisation d'une partie importante du système (et donc de réduire de façon importante le coût de conception et de réalisation de ces systèmes), et d'autre part facilite l'intégration et l'interfonctionnement des systèmes entre eux ;
- l'élaboration d'un tel modèle constitue une étape indispensable vers la définition de standards de communication, sans lesquels le déploiement de solutions multi-constructeur n'est pas possible.

Le projet a été mené en collaboration avec différents partenaires européens (University College London, Centre de Recherche Public Henri Tudor au Luxembourg, Hôpital Cantonal de Genève, Université Libre de Bruxelles, Société ITS à Bruxelles, GE-Europe). Le consortium NRV (Nantes/Rennes/Villejuif) a joué un rôle primordial dans l'élaboration du modèle.

2.2.2.2. Approche méthodologique

La méthodologie utilisée est conforme à celle classiquement adoptée pour la modélisation des systèmes d'information : elle consiste à définir le système à un niveau conceptuel, puis à un niveau organisationnel, puis à un niveau d'implantation. Elle distingue la *modélisation des fonctions* du système et la *modélisation des données* gérées par le système. Modèle fonctionnel et modèle des données sont bien évidemment liés. En effet, les flux apparaissant en entrée et en sortie des fonctions s'expriment sous la forme de listes de phrases tirées du modèle de données. Les éléments clés de la méthodologie mise en œuvre dans le projet MIMOSA étaient les suivants :

1. *Partir des vues des utilisateurs* ; c'est là le meilleur moyen de concevoir des systèmes *réellement adaptés* aux besoins. Ce n'est pas toujours facile car les vues des utilisateurs peuvent ne pas coïncider, voire s'avérer contradictoires, en particulier lorsqu'on s'intéresse à différentes modalités d'images ou spécialités médicales. En outre, il n'est pas toujours facile de faire la part entre les concepts de l'univers du discours et des considérations d'implantation (en principe non pertinentes à ce niveau).
2. *Abstraire les descriptions des objets du monde réel faites par les utilisateurs* ; cette étape est décisive et détermine le niveau de généricité du modèle. Il s'agit toujours d'un choix difficile qui suppose un compromis entre : i) des concepts plus *abstraits*, donc applicables à une population plus large d'objets, mais porteur d'une sémantique moins précise, et donc sujette à des interprétations différentes - et des concepts plus *concrets* donc nécessairement plus restrictifs, mais porteur d'une signification claire et non ambiguë, garante d'une interopérabilité réelle entre les équipements amenés à échanger des informations fondées sur ce modèle.

3. *Valider ces modèles*, d'une part auprès des utilisateurs, et d'autre part en démontrant que leur implémentation est possible.

2.2.2.3. Résultats

Les résultats obtenus dans le cadre du projet MIMOSA et auxquels j'ai directement contribué[17] concernent d'une part l'élaboration du modèle MIMOSA [Gibaud 92, MIMOSA 94, Garfagni 94, Aubry 96], et d'autre part la validation et le raffinement du modèle grâce au développement d'un démonstrateur [Stut 94, Gibaud 95].

Elaboration du modèle MIMOSA (Thèse de H. Garfagni)

J'ai plus spécifiquement travaillé sur : i) le modèle fonctionnel, (c'est-à-dire la description d'un système de gestion d'images en terme de fonctions et de flux de données), ii) la partie du modèle de données qui se situe en amont des images elles-mêmes (notion d'*examen*, de *demande clinique*, de *vue sur le dossier patient*, etc.) et enfin iii) celle qui permet de gérer la disponibilité des données pour les utilisateurs (notions de *plateforme*, de *niveau de disponibilité*, de *demande de mise à disposition*, etc.).

Modèle fonctionnel MIMOSA

Le modèle fonctionnel décrit les fonctions d'un système de gestion d'images [Garfagni 94, Garfagni 96]. Il a été conçu et utilise le formalisme des diagrammes de flux de données [Gane 79]. Il comprend quatre types de fonctions : (1) des fonctions offrant l'accès aux dossiers patients, (2) des fonctions supportant la réalisation d'actes médicaux conduisant à la production ou l'utilisation d'images, (3) des fonctions permettant la communication entre des utilisateurs, et enfin (4) des fonctions gérant la disponibilité des données.

Le modèle fonctionnel met en place des entités (dites entités externes) qui fournissent des informations aux fonctions de gestion d'images, ou qui utilisent les informations produites par le système de gestion d'images. Ces entités sont externes en ce sens qu'on ne cherche pas à modéliser leur comportement. Il s'agit par exemple de composants fonctionnels du Système d'Information Hospitalier (SIH), comme le Système de Gestion d'Actes (SGA), ou le Système de Contrôle des Droits d'Accès (SCDA).

Les flux de données entre les fonctions MIMOSA et les entités externes serviront à définir les services de communication entre les composants fournissant les services MIMOSA (par exemple un serveur d'images), et les applications clientes utilisant ces services (par exemple des sources d'images ou des stations de travail).

Les fonctions et les flux internes explicitent ce que le système fait. La plupart des tâches qui mettent en jeu les utilisateurs (comme l'acquisition, le traitement et l'interprétation des images) font intervenir des fonctions de gestion d'images selon une structure commune représentée Figure 6. Ces tâches sont réalisées à la demande du Système de Gestion d'Actes.

[17] Note: L'élaboration du modèle MIMOSA a été un travail collectif, et de ce fait il n'est pas possible de revendiquer la paternité de telle ou telle partie. Quoiqu'il en soit, ma contribution aux parties décrites ici a été importante. Les parties dans lesquelles je suis intervenu de façon plus ponctuelle ne sont pas du tout décrites ici.

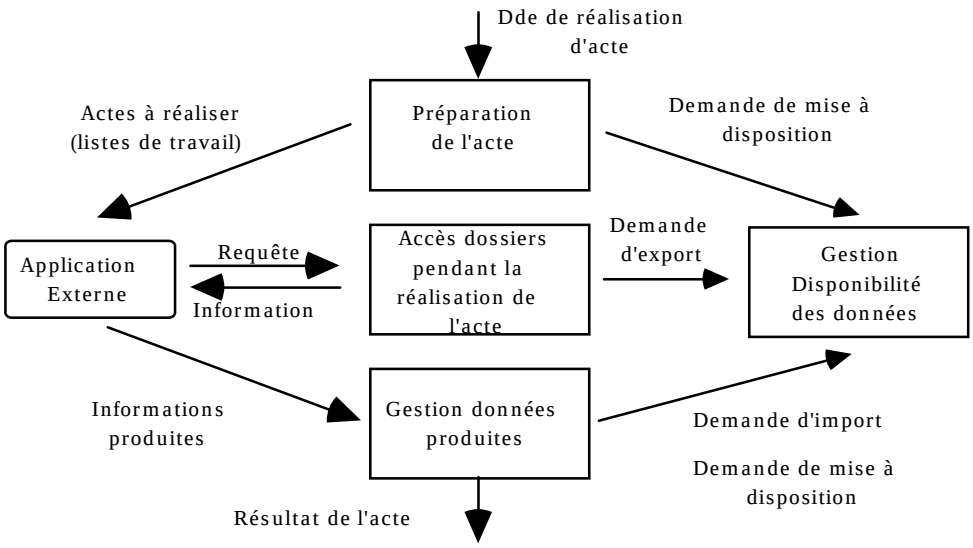


Figure 6. Structure des fonctions MIMOSA supportant l'acquisition, le traitement et l'interprétation des images

• L'étape de *préparation de l'acte* permet : (1) de fournir à l'application externe chargée de produire ou d'utiliser des images la liste des actes à réaliser, (2) d'assurer que les informations pertinentes pour la réalisation de la tâche seront effectivement disponibles sur les équipements mis en jeu (par exemple résultats d'examens antérieurs sous la forme d'images). Les contraintes en terme de disponibilité d'information sont représentées par une demande de mise à disposition et traitées par la fonction de gestion de la disponibilité des données.

• L'*accès au dossier* et l'appel des images est assuré par la fonction de gestion des consultations. L'accès aux images fait également intervenir la fonction de gestion de la disponibilité des données, sollicitée par une demande d'export.

• Enfin, les fonctions de *gestion des données produites* (par exemple images acquises, images résultant d'une procédure de traitement, comptes-rendus radiologiques multimédia) ont pour rôle : (1) de sauvegarder les données produites, (2) le cas échéant, de demander la mise à disposition des données vers d'autres utilisateurs (par exemple le demandeur de l'examen en question) et (3) d'informer le système de gestion d'actes de l'accomplissement de la tâche demandée.

Modèle de données MIMOSA

Le modèle de données a été conçu selon la méthodologie et le formalisme NIAM (Nijssen Information Analysis Method [Nijssen 89]). Il décrit les entités qui composent l'univers du discours, en précisant les attributs des concepts et les relations entre concepts : une partie de la sémantique de ces relations peut être explicitée (notamment par les contraintes de cardinalité). J'ai été plus particulièrement concerné par deux des trois parties de ce modèle, celles qui concernent le *contexte général de l'examen* et la *gestion de la disponibilité des données*.

Contexte de l'examen

Toute la difficulté consistait à concilier en un tout cohérent les différentes connotations du concept d'examen, qui contribuent à lui donner un sens :

- motivations médicales (pourquoi un examen est-il réalisé ? comment se situe-t-il par rapport à la prise en charge d'un patient ?)
- description de ce qu'il représente (type d'investigation, organe exploré)
- aspects organisationnels de sa réalisation (éventuelle découpe en étape, définition et enregistrement des ressources matérielles, temporelles, humaines nécessaires à son déroulement)
- aspects organisationnels relatifs à la diffusion des résultats.

Tous ces facteurs interviennent en différents points de la gestion des images, pour préparer la réalisation de l'examen, gérer efficacement les données produites (à qui faut-il les envoyer, combien de temps faut-il les

conserver, avec quel niveau de disponibilité ?), ou permettre tout simplement de les retrouver dans une base de données (consultation). En particulier, la politique de gestion des images en terme de diffusion et d'archivage dépend fortement du type d'examen et du contexte : par exemple, les images acquises pour une fracture du poignet seront gérées de façon très différentes de celles acquises pour le suivi thérapeutique d'une tumeur traitée par radiothérapie. Si la politique de gestion elle-même ne peut être définie de façon générale (elle dépend étroitement des spécialités médicales et des institutions), en revanche les mécanismes de gestion peuvent et doivent être définis de façon générique, en s'appuyant sur les caractéristiques communes de ces entités (par exemple type d'examen, organe exploré, service demandeur, etc.).

Une modélisation claire de ces concepts est d'autant plus nécessaire que différents composants du système d'information sont amenés à échanger ces informations - à savoir le SIH (notamment le Système de Gestion d'Actes), les sources d'images, les stations de travail.

Un ensemble de concepts a donc été introduit : *patient, demande clinique, examen, étape d'examen* (spécialisée en *étape d'acquisition, de traitement, ou d'interprétation*), *localisation du patient, unité d'organisation, vue sur le dossier patient, description d'observation, compte-rendu d'examen, demande d'avis, avis*, etc. Certains de ces concepts sont cohérents avec les objets d'information décrits dans le standard DICOM 3.0, publié en 1993 [Acr-Nema 93]. D'autres s'en écartent ou sont totalement nouveaux car absents de DICOM. Ces choix ont été faits en connaissance de cause, dans le but d'améliorer le standard en le complétant, et en levant certaines des ambiguïtés qu'il comporte.

Gestion de la disponibilité des données

Cette notion de disponibilité des données introduit au niveau conceptuel la notion d'un temps d'accès garanti aux images, considéré comme critique par les utilisateurs, et appelé niveau de disponibilité. Ce concept général permet d'unifier les différents concepts classiquement utilisés dans les PACS comme : le pré-chargement d'images à interpréter, l'accès aux examens antérieurs (sélection/récupération), la gestion d'archives hiérarchisées. L'originalité et l'intérêt essentiel du concept de gestion de la disponibilité des données est qu'il permet de définir ces fonctions d'une façon indépendante des ressources utilisées pour l'implémentation (supports de stockage, réseau de communication). L'approche proposée ne fait intervenir ces ressources que de façon déclarative, au niveau des paramètres de configuration du système. La solution proposée repose sur 5 entités principales :

- le concept de *plateforme* représente un équipement capable de recevoir des images (notion d'export), ou d'en introduire de nouvelles dans le système (notion d'import) ;
- le concept de *niveau de disponibilité* représente le degré (macroscopique) de disponibilité des données, sous la forme d'un délai d'accès aux données (une échelle possible est la suivante: niveau 1: accès dans la seconde, niveau 2 : accès dans la minute, niveau 3 : accès dans l'heure) ;
- le concept de *demande de mise à disposition* exprime une contrainte sur la disponibilité des images ; elle mentionne un niveau de disponibilité souhaité, un bénéficiaire (qui peut être une plateforme, un utilisateur, une unité d'organisation), ainsi qu'une durée pendant laquelle cette disponibilité doit être maintenue ;
- le concept de *répertoire MIMOSA* décrit un espace de stockage placé sous le contrôle d'un serveur MIMOSA ; les images gérées par un serveur MIMOSA sont réparties dans différents répertoires ; la présence des mêmes données dans plusieurs répertoires permet de répondre aux besoins de disponibilité exprimés dans les demandes de mise à disposition ;
- le concept de *copie* permet de désigner une instance particulière d'une série d'images, stockée dans un répertoire MIMOSA.

Le modèle proposé permet de gérer les déplacements d'images nécessaires pour garantir le délai d'accès souhaité (création de copies), et libérer les ressources une fois que ces contraintes sont expirées (destruction ou migration de copies).

Validation des modèles - Développement d'un démonstrateur à Rennes

(Collaboration avec le CERIUM et GE)

Objectif et contenu fonctionnel du démonstrateur

L'objectif de ce démonstrateur était triple :

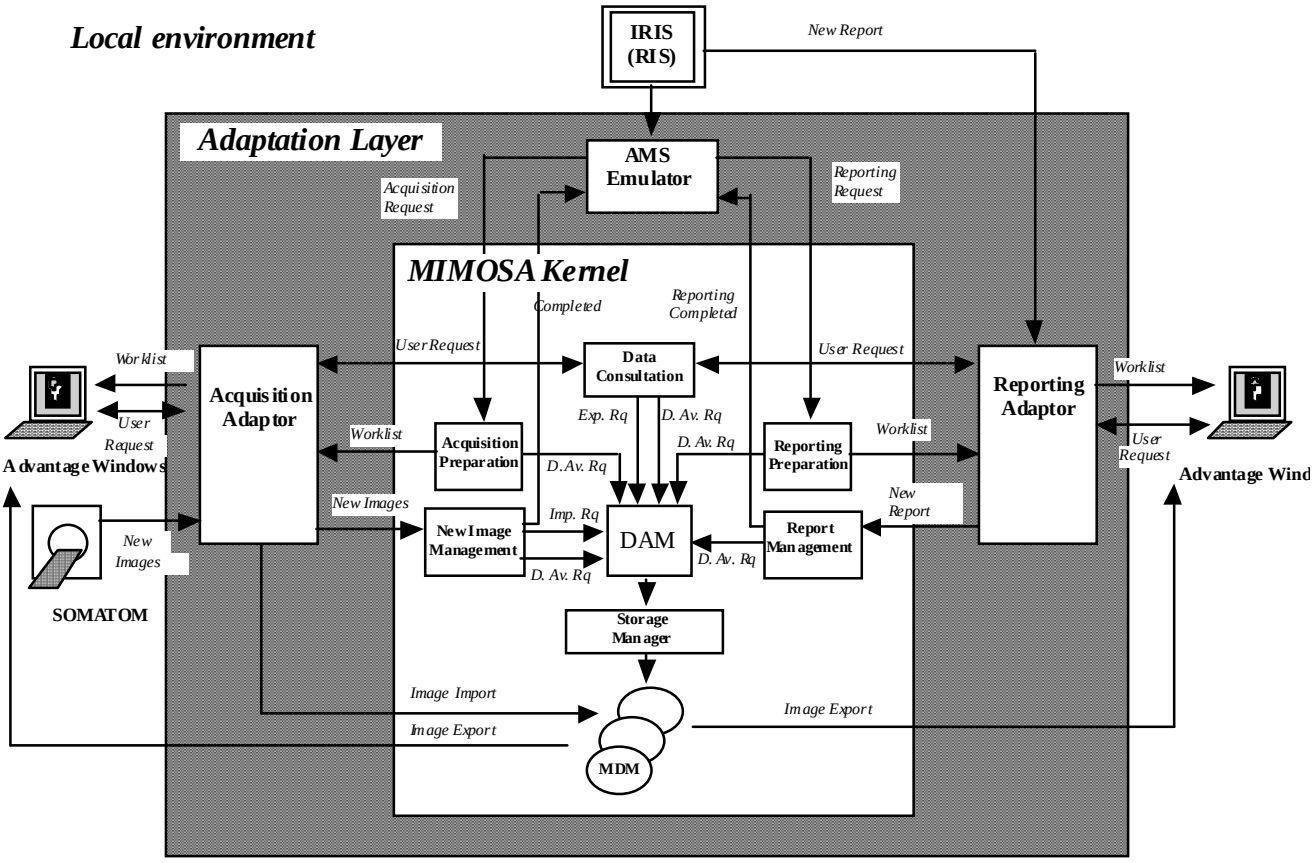
- *démontrer que le modèle est implémentable* : en effet, au delà de son intérêt théorique, une question essentielle est de savoir s'il est réaliste pour des constructeurs de concevoir des systèmes de gestion d'images fondés sur ce modèle. A cet égard, faire la démonstration d'un prototype, même partiel, a un impact déterminant. En outre, étudier comment un serveur générique exécutant les fonctions MIMOSA peut inter-fonctionner avec des équipements déjà existants sur un site (en l'occurrence un SIR, un scanner X, une station de travail) était également extrêmement instructif. Enfin, ce travail devait permettre de préciser la position du modèle par rapport aux standards existants (le standard DICOM en l'occurrence) ;
- *améliorer le modèle* : en effet l'implémentation conduit à préciser des notions, voire à remettre en cause certains choix. En effet le modèle conceptuel reflète avant tout la vue des utilisateurs. Or des considérations d'administration et de sécurité du système ont également une importance que l'implantation contribue à mettre en évidence ;
- *évaluer la valeur ajoutée*, tant du point de vue des utilisateurs, que de celui de l'administrateur du système.

Sur le plan fonctionnel, le démonstrateur visait à offrir les fonctions de gestion d'images en relation avec l'acquisition et l'interprétation d'examens radiologiques, en incluant des mécanismes de gestion de la disponibilité des données. En pratique il s'agissait de recevoir du SIR des demandes d'examens, d'offrir les listes de travail relatives à l'acquisition et l'interprétation de ces examens, en assurant la disponibilité des images à interpréter et des images antérieures pertinentes.

Architecture du démonstrateur

Les choix d'architecture ont tenu compte de deux contraintes majeures. La première est que le noyau MIMOSA, offrant les services MIMOSA, soit développé comme un ensemble logiciel *autonome*, *générique*, c'est-à-dire indépendant des composants du site. La seconde est relative à *l'ouverture* du système, ce qui implique que les services MIMOSA soient appelés en utilisant le standard de communication DICOM, chaque fois que ceci était possible. Ces contraintes nous ont conduits à concevoir une architecture comportant 3 couches (Figure 7) :

- la première (*local environment*) contient les composants existants sur le site, à savoir un SIR (logiciel IRIS développé localement), un scanner X (Somatom Siemens), une station de travail associée à l'environnement du scanner, et une station d'interprétation (Advantage Windows, GE) ;
- la seconde (*adaptation layer*) prend en compte les caractères spécifiques aux composants du site et interagit avec le serveur MIMOSA ; il inclut notamment l'émulateur de SGA ;
- la troisième (*MIMOSA kernel*), réalise les services du SGIM, conformément au modèle MIMOSA. Elle est mise en œuvre sous la forme d'un logiciel générique et indépendant du site.



Légende

AMS Emulator	: Act Management System Emulator : Emulateur de Système de Gestion d'Actes
DAM	: Data Availability Manager : Gestionnaire de la disponibilité des données
MDM	: MIMOSA Directory Manager : Gestionnaire de répertoire MIMOSA
Exp. Rq	: Export request : Demande d'export
Imp. Rq	: Import request : Demande d'import
D. Av. Rq	: Data Availability Request : Demande de mise à disposition des données

Figure 7. Architecture générale du démonstrateur MIMOSA

Expérience tirée du développement de ce démonstrateur

Ma contribution a principalement concerné la définition de l'architecture, l'utilisation du standard DICOM, ainsi que le retour critique sur le modèle. La réflexion sur l'implémentation a conduit à clarifier les notions de plateforme, d'import, de domaine MIMOSA, et à modifier de façon importante le modèle dynamique, intermédiaire entre le modèle conceptuel (qui reflète la vue des utilisateurs) et le niveau implantation. Outre l'amélioration et la clarification du modèle, l'un des apports essentiels a été de situer correctement le modèle MIMOSA par rapport au standard DICOM, mettant en évidence à la fois l'adéquation de ce standard pour implémenter certains services et ses limitations. Cette expérience s'est révélée fructueuse pour proposer des orientations des travaux de standardisation dans le domaine de la gestion des images.

En ce qui concerne l'évaluation de la valeur ajoutée résultant de l'utilisation du modèle, elle n'a pu être évaluée autant que nous l'aurions souhaité. En effet, s'il a été possible de faire des démonstrations (en particulier aux experts de l'Association Européenne de Radiologie en janvier 95), le système n'a pas pu être introduit en routine clinique, comme nous l'avions envisagé au début du projet. Ceci est du au fait que GE n'a pas souhaité poursuivre l'évaluation du démonstrateur au delà de 1994, terme officiel du projet EurIPACS/MIMOSA. Ce constructeur a préféré développer immédiatement un produit de type Gestionnaire d'Images (Système Topaz), fondé sur certains acquis du modèle MIMOSA. Ce système, installé à Rennes depuis 1996 est encore en

fonctionnement mais n'implémente pas la totalité du modèle, notamment la partie relative à la gestion de la disponibilité des images, concept pourtant très original que nous aurions souhaité valider de façon plus approfondie.

2.2.3 Utilisation du modèle MIMOSA pour la standardisation

2.2.3.1. Contexte

Les expériences PACS menées à travers le monde depuis le début des années 80 ont bien mis évidence le besoin de s'appuyer sur des standards pour l'échange et la gestion des images et des informations associées. Le besoin initial portait avant tout sur la nécessité de définir des formats d'images communs [Baxter 82]. Toutefois, la communauté des PACS a fait très tôt le choix de créer un standard spécifique à l'imagerie médicale, réglant à la fois les problèmes de formats, d'accès et de communication. Ces efforts de standardisation ont conduit aux versions 1.0 et 2.0 du standard ACR-NEMA[18] [Acr-Nema 85, Acr-Nema 88]. Ce standard, considéré comme insuffisant par la communauté des PACS a été notablement amélioré en 1993 avec la publication du standard DICOM 3.0 [Acr-Nema 93] qui apporte une réorientation dans deux directions principales. La première consiste à s'appuyer sur des protocoles de communication standards (standards *de facto* comme TCP-IP ou standards internationaux comme la pile de protocoles OSI[19]), venant remplacer la connexion point à point et le connecteur spécifique proposés initialement. La seconde concerne le domaine couvert par le standard, élargi à de nouveaux aspects de l'interopérabilité entre les équipements ou systèmes d'information intervenant dans les PACS [Best 92]. Il s'agit, notamment, de classes de services permettant la gestion d'informations concernant le patient, l'examen ou les résultats de l'interprétation des images. Cette seconde direction déborde largement les préoccupations initiales du comité ACR-NEMA, centrées jusqu'alors sur la représentation et la communication des images. Ceci pose le problème de l'articulation de ces nouveaux standards avec ceux produits par d'autres groupes de standardisation, comme le Comité Technique 251 du CEN[20] mis en place en 1990 pour développer une famille de standards cohérents dans le domaine de l'informatique médicale [Mattheus 92] selon une approche très différente de celle du Comité ACR-NEMA.

Peut-il y avoir une convergence entre l'approche pragmatique du comité ACR-NEMA et celle beaucoup plus globale et générique du TC 251 ? C'est la question à laquelle nous avons tenté d'apporter une réponse, par le biais de notre participation au Groupe de Travail n°4 du CEN TC251 (Medical Imaging and Multimedia) entre 1991 et 1997, en nous appuyant sur les résultats du projet EurIPACS/MIMOSA. Nous avons donc étudié comment le modèle MIMOSA, pris comme un modèle de référence (au sens de Day et Zimmerman [Day 83]), pouvait contribuer à la standardisation dans le domaine de la gestion des images.

2.2.3.2. Approche méthodologique

L'approche que nous avons adoptée tenter de concilier deux approches du développement des standards, une approche sectorielle, et une approche globale.

1) *Stratégie sectorielle* : Elle consiste à faire porter l'effort de standardisation sur des secteurs limités, en répondant à la demande du marché à court et moyen terme. Du fait de son efficacité, ce type d'approche a le plus souvent les faveurs des communautés d'utilisateurs et des industriels. L'intérêt de cette stratégie est sa prudence vis-à-vis des évolutions technologiques. Deux critiques majeures peuvent cependant lui être faites :

- Procéder par petits pas, dans des secteurs limités, n'exploite pas toutes les possibilités qu'offrirait une approche plus globale et plus abstraite. Par exemple le Comité ACR-NEMA a fait le choix d'une vision essentiellement 2D des images médicales, et très liée aux différentes modalités, alors qu'une vision plus abstraite - de type multidimensionnelle - comme celle élaborée dans le cadre de MIMOSA aurait pu être recherchée.
- Les groupes de standardisation ont tendance à poursuivre leur travail, après avoir résolu les problèmes les plus cruciaux, en abordant de nouvelles questions qui se situent en marge du domaine d'intérêt initial

---

[18]ACR-NEMA : Comité associant l'American College of Radiology et la National Electrical Manufacturers Association

[19] OSI : Open Systems Interconnection

[20]CEN : Comité Européen de Normalisation

[Oksala 94]. Ainsi, après avoir défini les classes de services permettant la transmission et la recherche/récupération des images, le Comité ACR-NEMA s'est préoccupé du contexte de production et d'utilisation de ces images. Cette tendance générale à déborder la thématique d'origine, pose le problème de la cohérence de standards développés de façon indépendante et qui peuvent donc être redondants et incompatibles.

2) Stratégie globale : Cette stratégie consiste à prendre en compte l'ensemble des besoins et à les abstraire pour dégager une architecture générale, ou modèle de référence, nécessaire pour régir l'interaction entre les composants du système d'information. Cette stratégie a été soutenue par la Commission Européenne à travers des programmes de Recherche et Développement comme AIM I, AIM II et ESPRIT (par exemple RICHE [Frandji 94]). Ainsi l'Union Européenne a mandaté le CEN pour développer des standards selon ce type d'approche. Toutefois, la difficulté d'une telle entreprise se doit pas être sous-estimée et les résultats de ces travaux ne s'avèrent significatifs que sur de longues périodes. Ainsi les travaux sur l'architecture des systèmes d'information de santé ne se sont concrétisés qu'en 1998 [CEN ENV 12967 98]. Ceux sur l'architecture des informations de santé ont donné lieu à une première norme expérimentale en 1995 [CEN ENV 12265 95], intéressante mais peu utilisée en pratique si ce n'est dans le cadre de projets financés par l'Union Européenne (par exemple le projet Synapses [Grimson 98]). Celle-ci a été suivie et remplacée en 1999 par une nouvelle série de pré-normes [CEN ENV 13606 99] beaucoup plus mûres.

Stratégie globale et stratégie sectorielle apparaissent donc très différentes, et rien ne prouve réellement ni leur compatibilité ni leur incompatibilité. Notre contribution montre comment un modèle de référence comme le modèle MIMOSA peut contribuer au progrès de la standardisation en imagerie médicale, au travers d'une collaboration entre un organisme utilisant une approche globale (TC 251) et un organisme pratiquant une approche sectorielle (comité DICOM).

2.2.3.3. Résultats

Cette contribution se situe à deux niveaux, (1) l'élaboration et la promotion d'architectures de référence servant de cadre de développement pour les futurs standards, (2) l'extension d'un standard sectoriel comme le standard DICOM. Ce second type de contribution s'appuie sur les résultats obtenus lors du développement du démonstrateur MIMOSA, qui nous a permis d'identifier certaines limitations du standard DICOM et nous a conduits à proposer des solutions [Gibaud 98]. Elles concernent trois aspects importants de la gestion des images : (1) la gestion des listes de travail, (2) les imports d'images, et (3) la gestion de la disponibilité des images.

Nécessité de modèles de référence pour la standardisation

Le modèle MIMOSA, parce qu'il précise les éléments fonctionnels inhérents à la gestion d'images, indépendamment des techniques d'imagerie et des spécialités médicales productrices et utilisatrices d'images, constitue un modèle de référence dans le domaine de la gestion d'images. En effet, ce modèle définit de façon "externe" des services génériques de gestion d'images, comme la préparation des acquisitions, la gestion de la disponibilité des images ou la gestion des consultations d'images. Son caractère générique laisse la place à une spécialisation toujours possible des concepts, quand c'est nécessaire, et garantit que son domaine d'application soit suffisamment large. Il explicite les interactions entre les fonctions de gestion d'images et les composants du SIH et, notamment, les relations avec le gestionnaire d'actes responsable de l'organisation de l'activité. Cette explicitation est capitale pour le développement de standards. En effet, l'interopérabilité entre des systèmes aussi divers qu'une source d'images, un système de gestion d'images ou un système d'information d'unité de soins n'est possible que si les informations échangées et les services dans le contexte desquels ces échanges sont réalisés, sont définis de façon suffisamment explicite. L'un des apports principaux consiste justement à définir le niveau d'abstraction approprié. En effet, comme on l'a déjà souligné, la modélisation de ces informations est toujours un compromis entre un niveau d'abstraction faible, qui risque de restreindre le champ d'application du modèle et donc de limiter de façon dramatique l'impact du standard qui en découlerait, et un niveau d'abstraction excessif, qui le vide d'une partie de sa signification et donc compromet sa capacité à assurer une interopérabilité réelle. Enfin, de par sa précision formelle, le modèle peut être efficacement confronté à d'autres modèles plus généraux (par exemple modèles d'actes, de comptes-rendus d'actes, d'éléments d'un dossier patient). Cette confrontation conduit à renforcer ou à remettre en cause ces modèles et contribue donc à l'émergence de modèles plus larges, globalement cohérents.

Contribution à DICOM

La conception du démonstrateur MIMOSA a permis de situer correctement le modèle MIMOSA par rapport au standard DICOM, en mettant en évidence l'adéquation de ce standard, en particulier vis à vis des trois services suivants :

- la gestion des listes de travail ;
- les imports d'images, c'est-à-dire l'entrée des images dans le système de gestion d'images ;
- la gestion de la disponibilité des images pour prendre en compte le stockage distribué.

Gestion des Listes de Travail

La gestion des listes de travail est importante vis-à-vis du problème de l'organisation de l'activité ; elle est abordée dans le modèle MIMOSA au travers de fonctions telles que "Préparation des acquisitions", "Préparation des traitements", "Préparation des interprétations". Cette programmation est réalisée par le SGA, et consiste à définir les différentes étapes d'acquisition, de traitement ou d'interprétation d'un examen. Ce concept d' "Étape d'Examen", qui rassemble l'ensemble des ressources nécessaires à la réalisation d'un acte (personnel, matériel, temps, informations), est l'un des principaux concepts du modèle "Contexte de l'Examen" du modèle MIMOSA.

Le SGA fournit les informations relatives aux actes programmés, ce qui déclenche au niveau du SGIM la création ou la mise à jour de listes de travail pour chaque équipement, tout en garantissant (quand c'est possible) la disponibilité des images antérieures qui sont pertinentes dans le contexte de l'acte à réaliser.

Services DICOM utilisables et limitations

Dans DICOM 3.0, les listes de travail pouvaient être implantées en utilisant les classes de service "Study Management" et "Patient Management" et, notamment, les SOP[21] Classes "Detached Study Management" et "Detached Patient Management". Dans le démonstrateur, nous avions envisagé l'utilisation de ces SOP Classes pour permettre : (1) au SGA de communiquer les Étapes d'Examen à réaliser au SGIM, et (2) au SGIM de communiquer la liste de travail aux équipements réalisant les actes.

Les problèmes rencontrés se situaient : (1) au niveau des concepts, les entités présentes dans DICOM ne se superposant que partiellement avec celles de MIMOSA, et (2) au niveau des services.

En ce qui concerne les concepts, la notion de "Study" posait un problème. Dans un souci de généralité, le comité ACR-NEMA n'avait pas défini précisément les relations entre "Study", "Procédure" et équipement. Il s'ensuit que la réservation des ressources nécessaires à la réalisation d'un examen n'était pas toujours possible, notamment quand une "Study" nécessite la mise en jeu de plusieurs équipements. Dans le modèle MIMOSA, ce problème est abordé par le biais du concept d'Étape d'Examen, absent de DICOM. Si le module DICOM Study Scheduling[22] permet effectivement d'associer à un examen sa date de programmation et le médecin qui doit le réaliser, il ne prend pas en compte le cas où l'examen est composé de plusieurs étapes mettant en jeu des ressources différentes.

Parallèlement, en ce qui concerne les services DICOM, deux problèmes principaux ont été identifiés qui concernent : (1) la dynamique de l'échange et les services DICOM applicables, et (2) la définition des critères de construction de la liste de travail. Si la Classe de Service "Study Management" s'avère bien adaptée à la *notification d'événements* (comme la programmation d'un nouvel examen ou l'annulation d'un examen programmé), elle ne permet pas facilement l'*initialisation* de ces listes de travail, par exemple à partir d'une modalité d'imagerie, ni a fortiori la définition des critères à partir desquels les examens sont inclus dans la liste.

Proposition d'extension

L'analyse précédente nous a convaincus que les services DICOM devaient donc être étendus pour offrir une solution plus adaptée au problème des listes de travail. Pour les objets, il nous a paru nécessaire soit de modifier les objets DICOM existants, soit de leur adjoindre de nouveaux objets permettant de rendre plus explicites les ressources à associer à un acte particulier. Il nous paraissait nécessaire de définir dans DICOM un mécanisme permettant à une modalité, ou à tout autre équipement sur lequel il est nécessaire de gérer des listes de travail, d'initialiser ou de rafraîchir une liste de travail. Les orientations prises par le CEN TC251 WG4 en collaboration

---

[21] SOP : Service Object Pair : Association d'un objet d'information DICOM à un groupe de services applicables à cet objet

[22] Dans DICOM, un module est un groupe d'éléments d'information qui caractérisent une entité.

avec le Comité ACR-NEMA lors de la définition d'une classe de service "Basic Worklist Management" sont allés tout à fait dans ce sens [CEN PT20 95, Gibaud 96b]. Plus récemment c'est le même type de solution qui a été proposé pour la gestion de "listes de travail d'interprétation" avec l'introduction dans le standard DICOM d'une nouvelle entité d'information "étape d'interprétation programmée" (scheduled interpretation step) [Dicom S52 00].

Import des images

Conformément à l'approche MIMOSA, les images en cours de création, par exemple au niveau d'une source d'images, ne sont pas connues du SGIM. Elles sont introduites dans le SGIM par une opération appelée *import*, qui consiste à déclarer les images puis à les envoyer dans un espace de stockage contrôlé par le SGIM. Ces deux étapes permettent : (1) d'importer les images dans un espace de stockage convenant à leur utilisation ultérieure, (2) d'éviter des transferts multiples d'images, et (3) d'être cohérent avec une architecture distinguant les modules logiciels qui décident du déplacement des images de ceux qui les reçoivent effectivement.

Services DICOM utilisables et limitations

La solution consistant pour une source d'images à "pousser" les images dans un espace de stockage donné en utilisant la Classe de Service "Storage" n'était pas satisfaisante, pour deux raisons principales. D'abord, cette solution ne permet pas de choisir l'espace de stockage adapté au contexte et conduit donc souvent à recopier successivement les données dans différents espaces. En outre, cette Classe de Service ne possède pas une sémantique équivalente à celle utilisée dans le cadre du modèle MIMOSA, où l'import sous-entend une notion de placement des images sous la responsabilité du SGIM.

Une autre solution envisageable pour réaliser l'import d'une série d'images était d'utiliser les services N-CREATE ou N-SET de la Classe de Service "Study Component Management". Cette demande rattache la série d'images au contexte général de leur acquisition, c'est-à-dire la "Study" et le "Patient" associés. Le SGIM peut alors exploiter ces informations contextuelles pour définir les contraintes de disponibilité à appliquer, par l'intermédiaire de règles de configuration. Ces contraintes sont ensuite traitées par le Gestionnaire de la disponibilité des données (DAM, pour Data Availability Manager) pour en déduire dans quel espace de stockage (Répertoire MIMOSA) les données doivent être importées. L'import lui-même utilise le service C-MOVE de la Classe de Service "Query/Retrieve", pour déplacer les images vers l'espace de stockage choisi. Les images sont effectivement déplacées à l'aide du service C-STORE.

Les deux solutions envisagées ci-dessus amènaient à dévoyer la sémantique originelle des services DICOM cités, notamment celle du Service "Study Component Management", qui n'implique nullement une commande de déplacement des images.

Proposition d'extension

Ce type de problème a été pris en compte dans une proposition d'extension de DICOM appelée "Storage Commitment Service Class" [CEN ENV 12922 97], étudiée dans le cadre d'une équipe projet du CEN TC251/WG4. Cette extension permet à une entité d'application de déclarer une liste d'images, éventuellement associée à un "Study Component", pour que ces images passent sous la responsabilité de l'entité d'application fournissant ce service. Cette transaction est considérée comme satisfaite quand l'ensemble des images concernées a effectivement été transféré sous le contrôle de l'application offrant le service. Un tel service répond parfaitement au besoin identifié dans MIMOSA dans le cadre de l'import vers un SGIM des images produites par un équipement.

Gestion de la Disponibilité des Images

Dans le modèle MIMOSA, la gestion de la disponibilité des images recouvre l'ensemble des opérations amenant à déplacer des images entre des espaces de stockage, pour satisfaire des contraintes sur la disponibilité, contraintes déterminées à partir de tout un ensemble d'informations contextuelles et d'évènements divers. Il peut s'agir : (1) de déplacer les instances des images en provenance et/ou à destination de répertoires MIMOSA ; il s'agit d'importer dans un répertoire MIMOSA de nouvelles images créées sous le contrôle d'une application externe, ou d'exporter vers une application externe des images situées dans un répertoire MIMOSA, ou de déplacer des images entre deux répertoires MIMOSA ; (2) de s'assurer qu'un répertoire MIMOSA dispose effectivement des ressources de stockage nécessaires pour recevoir des images ; (3) de détruire des instances d'images, dont la présence n'est plus nécessaire, suite à l'expiration des demandes de mise à disposition les concernant.

Services DICOM utilisables et limitations

La Classe de service "Query/Retrieve" possède le service C-MOVE, qui répond parfaitement au besoin de déplacement d'images ou de séries d'images entre deux entités d'application. Par contre, DICOM ne possède aucun service qui convienne à la négociation des espaces de stockage en préalable à un transfert d'images. Cette absence peut entraîner, en cas de saturation des ressources de stockage d'une entité d'application, une charge inutile du réseau.

DICOM ne possède pas non plus de service permettant à une entité d'application de demander à une autre la destruction d'une image ou d'une série d'images. En effet, les services N-DELETE et N-ACTION ne peuvent être utilisés, car il s'agit de services dits "normalisés", qui ne sont donc applicables qu'à des objets "normalisés", alors que les images et les séries d'images sont des objets "composites"[23].

Proposition d'extension

Pour pallier à ces insuffisances, nous avons proposé d'introduire deux services appelé M-INQUIRE et M-DELETE. Le premier permet de s'assurer qu'un répertoire MIMOSA particulier dispose de l'espace de stockage nécessaire pour accueillir une instance d'images. Le second permet d'ordonner la destruction d'une instance particulière d'image, détenue par un Gestionnaire de répertoire MIMOSA. Il est intéressant de noter que dans cette transaction, il n'est jamais fait référence à un exemplaire physique d'images (qui serait par exemple désignée par un chemin vers un fichier). Au contraire, l'image à détruire est désignée par son identificateur unique et il est de la responsabilité du Gestionnaire de répertoire MIMOSA de gérer le lien avec la ou les copies physiques.

Conclusion

Le recul de quelques années permet de mesurer la richesse du modèle MIMOSA, encore largement inexploitée. En effet, si le modèle des "vues et groupements" (non décrit dans ce document) a fait l'objet d'une exploitation par plusieurs équipes projets du CEN (PT19, PT34), des pans entiers du modèle sont restés jusqu'à aujourd'hui lettre morte.

En particulier le modèle du "noyau image et des traitements" (non décrit dans ce document [Bizais 94]) est resté totalement inexploité. Pourtant l'intérêt d'une représentation plus générique et plus abstraite des images (caractère multi-dimensionnel, signification des pixels) devient chaque jour plus évidente, en particulier au sein du comité DICOM où l'on commence à mesurer les limitations d'une conception purement 2D des images médicales. Des groupes de travail comme le WG17 (Multi-dimensional data) mais également les groupes qui se focalisent sur des différentes modalités d'imagerie éprouvent le besoin de sortir du cadre un peu étroit choisi initialement. Le moment venu, cette partie du modèle MIMOSA pourra donc peut-être s'avérer contributive.

Enfin le modèle MIMOSA possède une dimension systémique et architecturale qui elle non plus n'a guère été utilisée. On retrouve là la réticence constante des organismes de standardisation à poser des hypothèses d'architecture. Or il nous paraît clair que des problèmes comme celui de la gestion de la disponibilité des images ne pourront pas être abordés efficacement sans que soient clairement posées ces hypothèses : appartenance d'une plateforme à un système, rôle précis d'un composant vis à vis de ce système. Vis à vis de ce problème de disponibilité des images, l'industrie a clairement fait le choix de s'en remettre totalement au progrès des performances des technologies de communication et de stockage, sans chercher à le traiter de façon déterministe. Là aussi, les volumes de données à gérer continuant eux aussi à augmenter, on peut penser que ce même problème ne fasse à nouveau surface - probablement au titre de la qualité de service - et peut-être alors certaines des idées de MIMOSA auront-elles un regain d'intérêt.

2.3. Perspectives

La pratique médicale est aujourd'hui et peut-être plus que jamais en pleine transformation, sous la double pression de l'évolution technologique et de la nécessité de contenir l'évolution des dépenses de santé. Ces mutations concernent aujourd'hui l'ensemble des pays industrialisés. En effet, le niveau de qualité des soins exigé par les citoyens augmente, du fait des progrès scientifiques, de l'élévation générale du niveau de vie et de l'accès de plus en plus facile à l'information qui permet aux citoyens d'être mieux informés et donc plus critiques vis à vis des soins qui leur sont prodigués. En même temps la nécessaire maîtrise des dépenses de santé suppose une

[23]dans DICOM, un objet "normalisé" (par ex. "Patient", "Visit", "Study") représente une seule entité du monde réel ; un objet composite (par ex. "Image", "Curve") est composé d'éléments caractérisant plusieurs entités du monde réel

rationalisation de l'organisation des soins, qui passe par l'informatisation des plateaux techniques et des unités de soins et la mise en réseau des institutions de santé, à tous les niveaux.

Ces transformations se sont traduites aux USA par d'importants investissements vers ces nouvelles technologies, dynamisant ainsi tout un secteur industriel. En Europe, on constate que l'effort de maîtrise des dépenses de santé agit également "au premier degré" en restreignant sévèrement les investissements des hôpitaux.

Pour autant, et même aux USA la volonté politique est une condition nécessaire pour conduire une mutation aussi importante que celle de l'entrée de la médecine dans l'ère de la société de l'information, mais ce n'est pas une condition suffisante. Aussi la question que nous souhaitons poser ici est la suivante :

"**Les conditions sont-elles aujourd'hui réunies aux plans scientifique et technique - car le propos se limite ici à ces aspects - pour permettre une mutation massive vers une gestion informatisée des données médicales à l'hôpital et par extension au sein du système de santé tout entier ?**"

Des éléments de réponses sont à rechercher au niveau de la technologie elle-même. Pour apprécier à sa juste valeur l'évolution intervenue depuis dix ans il est instructif de relire l'article de Maguire de 1991 [Maguire 91].

Au niveau matériel,

- la puissance de traitement des machines augmente sans cesse et s'avère aujourd'hui largement suffisante pour satisfaire l'immense majorité des besoins ressentis en médecine ;
- les performances graphiques des plateformes standards (stations de travail et, de plus en plus, postes de travail de type PC Windows ou Windows NT) progressent sans cesse et celles-ci sont de plus en plus aptes à une utilisation dans le cadre d'applications médicales, induisant ainsi une forte réduction des coûts ;
- sans rentrer ici dans une analyse détaillée, les technologies de stockage numérique disponibles aujourd'hui permettent de faire face aux besoins de stockage temporaire et d'archivage à long terme des images à des coûts raisonnables [Chunn 97], même si de leur côté les volumes de données à gérer augmentent constamment ;
- enfin les technologies des réseaux à haut débit sont de plus en plus banalisées, tant au niveau des équipements actifs (Ethernet 100 Mbit/s et bientôt 1Gbit/s, ATM[24]) que des supports de câblage (réseaux rapides sur paires torsadées, fibre optique) et des infrastructures métropolitaines (réseaux régionaux).

Au niveau logiciel, les outils et composants relevant des technologies générales (non spécifiques du domaine médical) s'avèrent également de plus en plus applicables à la gestion des données médicales multimédia. Les outils et syntaxes de communication issus de l'environnement internet/intranet sont nombreux et diversifiés : outils et syntaxes pour la communication et la messagerie (MIME/S-MIME, FTP, HTTP, HTML, XML), langage Java, formats standardisés d'images et extensions multimédia (GIF, JPEG, SMIL, MPEG2, etc.). Ces outils et composants appellent toutefois quelques réserves :

- les outils de messagerie actuels ont des limitations importantes tant au niveau des volumes des données susceptibles d'être transportés que des moyens de structuration de l'information au sein des messages ;
- sur le plan de la sécurité des échanges, l'information médicale présente une spécificité certaine et les outils disponibles aujourd'hui (au moins certains d'entre eux) ne présentent pas toutes les garanties nécessaires ;
- comme ceci a été souligné précédemment les syntaxes et protocoles HTML/HTTP qui sont ceux largement déployés aujourd'hui privilégient avant tout un dialogue de type utilisateur / application. La syntaxe XML est sur ce plan riche de promesses car elle autorise une structuration du contenu et s'avère donc bien adaptée à des communications d'application à application.

Certains des outils précédents [Messerschmitt 96] ainsi que l'apparition du langage Java [Nicolas 97] modifient sensiblement les données du problème au plan architectural et du déploiement du système.

(1) La notion de machine virtuelle, en définissant un jeu d'instructions indépendant du système d'exploitation de la machine conduit à la portabilité des logiciels entre toutes les plateformes disponibles sur le marché. Cette propriété facilite considérablement l'installation et la maintenance des ressources logicielles au sein d'un système complexe ; ceci est évidemment fondamental dans une structure comme un hôpital qui souhaiterait migrer massivement vers une gestion informatisée des données médicales.

---

[24] ATM : Asynchronous Transfer Mode

(2) La mobilité du code source introduit par ailleurs une grande souplesse en terme de distribution des traitements d'informations - du côté du serveur ou du côté de l'application cliente. Des composants comme les Java Beans constituent un socle de base sur lequel peut se fonder l'interopérabilité entre des applications (par partage d'objets distribués et activation de méthodes à distance) [Nicolas 97, Messerschmitt 96].

(3) Enfin, ces nouvelles possibilités peuvent conduire à une approche différente de l'interopérabilité, en particulier pour gérer la présentation des informations sur la plateforme de l'utilisateur [Messerschmidt 99]. Ainsi l'utilisation de code mobile provenant de la même source et chargé lors de l'exécution peut permettre de faire l'économie du développement de standards spécifiant au niveau de la syntaxe de transfert tous les paramètres de mise en forme d'un document. Toutefois cette approche n'est applicable que si la plateforme destinataire se contente d'afficher le document sans permettre la modification de son contenu ou de sa présentation.

Toutes ces évolutions sont susceptibles de modifier en profondeur les rôles (au sens du traitement de l'information) des composants traditionnels d'un système d'information (par exemple radiologique) ou d'un PACS et donc l'architecture de ces systèmes. Par exemple, on peut aujourd'hui imaginer que des consoles de diagnostic ne soient plus considérées comme des équipements d'imagerie à proprement parler, mais comme de simples plateformes informatiques standards, accédant via le SIR (ou le gestionnaire d'images) à des ressources logicielles de traitement et de visualisation d'images, de rédaction de comptes-rendus multimédia, voire d'aide à la décision. La nouveauté réside dans cette centralisation des ressources logicielles, qui permet à la fois de banaliser l'accès à ces ressources, tout en facilitant l'adaptation de chaque outil à chaque tâche ou à chaque utilisateur.

Ces mutations soulèvent de nouveaux débats et enjeux d'une part au niveau de l'interopérabilité entre les composants, d'autre part au plan de l'intégration, et enfin au plan de la qualité de service.

2.3.1. Interopérabilité

Ce terme d'interopérabilité est parfois utilisé à tort et à travers. La définition donnée ici est proche de celle proposée par Fontaine [Fontaine 96] et par le CEN [Reynolds 00]. L'interopérabilité entre des composants d'un système d'information peut être définie comme la capacité de ces composants à coopérer en vue de la réalisation d'une fonction commune. Cette notion de fonction commune révèle une *intention* et dénote donc une dimension architecturale.

Comme on l'a vu précédemment deux aspects différents de l'interopérabilité doivent être distingués, un aspect conceptuel et un aspect d'implémentation. L'aspect conceptuel (interopérabilité sémantique) recouvre d'une part la définition de la sémantique des informations échangées (le *quoi*), et d'autre part la définition de l'échange (*qui* échange et *pourquoi*). L'aspect implémentation (interopérabilité syntaxique) concerne les mécanismes d'échange et les syntaxes de représentation des informations échangées (le *comment*).

Cette prise en compte du *pourquoi* est fondamentale car en définitive la définition des informations échangées, leur structuration et le choix d'une syntaxe de représentation dépendent des traitements qu'on souhaite leur appliquer : simple affichage à un utilisateur ou traitement dans le cadre d'un système automatisé [Rossi Mori 98].

Les interrogations qui demeurent et donc les travaux à mener se situent à la fois sur les trois plans évoqués précédemment, à savoir :

- *la structure des données médicales multimédia,* pour préciser le contenu sémantique de l'information échangée,
- *l'élaboration de modèles de référence de domaine,* explicitant les rôles fonctionnels respectifs des composants du système d'information et les processus d'échange entre ces composants,
- *la synthèse de ces deux éléments au sein de standards,* avec le choix de syntaxes et de mécanismes d'échanges appropriés.

2.3.1.1. Structure des données médicales multimédia

Malgré les évolutions technologiques récentes on constate que la technologie du multimédia, au sens où elle associe au sein d'un même document ou d'une même structure de données des informations de natures différentes (texte libre, texte structuré, voix, images, signaux, vidéo, etc.) n'a pas encore réellement investi le champ du traitement de l'information médicale. Si les données médicales sont de plus en plus acquises et stockées sous

forme numérique, leur traitement et leur visualisation restent dévolus à des applications très cloisonnées en fonction des types de données.

Un exemple très significatif est celui des comptes-rendus radiologiques. Nul ne conteste aujourd'hui l'intérêt potentiel de comptes-rendus radiologiques multimédia structurés capables de représenter à la fois : le texte libre de l'interprétation du radiologue, les références aux images les plus significatives de l'examen, le résultat de mesures effectuées sur des images et permettant de quantifier des paramètres morphologiques ou physiologiques, la référence à des images ou examens antérieurs pertinents, etc. Pour autant, il n'existe quasiment pas aujourd'hui de systèmes industriels permettant la production de tels documents et leur distribution dans l'hôpital ou vers des médecins demandeurs en ville.

La définition de standards pour la structuration et l'échange de tels documents a donné lieu à des travaux intéressants [Dicom S23 00], [CEN PT34 99]. Une des difficultés principales de ces travaux était la définition du domaine couvert (scope). On retrouve là le problème récurrent, déjà mis en exergue précédemment, de la définition d'un domaine couvert suffisamment large pour permettre à la fois une généricité des structures d'information proposées et une précision suffisante pour permettre l'interopérabilité. Ces travaux ont opté pour une structure très générique de documents mais à laquelle il faut maintenant adjoindre des modèles de contenu, adaptés à différents contextes concrets. La définition de ces modèles de contenu est un problème en soi. Qui doit les définir, les diffuser, les maintenir ? Un autre aspect clé est la définition de l'interopérabilité des applications qui échangent de tels documents : se limite-t-elle à l'affichage des textes et des images ? qu'en est-il de la présentation ? Tous ces problèmes - qui avaient d'ailleurs été plus qu'évoqués au cours du projet MIMOSA - restent toujours relativement ouverts.

Ce qui vient d'être dit peut également être appliqué à d'autres documents médicaux, comptes-rendus opératoires, documents de préparation d'actes thérapeutiques en chirurgie ou en radiothérapie, voire également à l'ensemble des documents ou dossiers médicaux. Cette généralité est aujourd'hui admise et a bien été prise en compte dans les travaux du CEN sur l'architecture étendue des informations de santé [CEN ENV 13606 99].

Sur ce problème de l'intégration de l'image au sein de documents multimédia, une question intéressante est de savoir si les résultats proposés tant dans le cadre de DICOM (structured reporting) que du CEN (architecture étendue des informations de santé) seront susceptibles de conduire à des implémentations crédibles et à quelle échéance. Au niveau français le Groupe de travail n°11 de l'association EDISANTE se propose de définir des formats d'échanges de documents médicaux multimédia et devrait donc apporter à cette question des éléments de réponse.

2.3.1.2. Elaboration de modèles de référence de domaine

On a souligné précédemment la dimension architecturale de l'interopérabilité, qui consiste à bien identifier les composants impliqués dans un échange ainsi que la finalité de cet échange. Il est clair que cette mise en lumière ne peut être faite de façon séparée pour chacun des échanges qui concernent un système d'information départemental et qu'au contraire une vision systémique - du type de celle qui avait été utilisée dans le cadre du projet MIMOSA - doit être utilisée. Cette vision des choses, déjà largement exposée dans ce document, bien que rationnelle a suscité et suscite encore beaucoup de réticences chez les industriels, par exemple au sein du comité DICOM. En effet, tout effort de standardisation de l'architecture est perçu comme induisant des contraintes inadmissibles pour les industriels au plan de la définition fonctionnelle des produits.

Pourtant les évolutions technologiques citées précédemment et notamment l'émergence de syntaxes pour la représentation et l'échange de données structurées (XML) et l'apparition de mécanismes sophistiqués pour le partage d'objets distribués ou l'activation de méthodes à distance (CORBA IDL[25], Java RMI, Java Beans, COM) rendent aujourd'hui possible l'assemblage de systèmes complexes fondés sur des composants fournis par des constructeurs différents. La technologie semble disponible mais présuppose la définition de modèles architecturaux décrivant les composants de ces systèmes et leurs interactions. Il est souhaitable par ailleurs que ces architectures soient décrites sans référence explicite à des syntaxes d'échange particulières, pour pouvoir être déclinées le cas échéant selon différents schémas d'implantation (CORBA, Java, COM, voire d'autres à venir).

Sur la base de l'expérience du projet MIMOSA, il nous semble donc aujourd'hui souhaitable, d'élaborer des modèles de référence pour la gestion et l'échange d'informations médicales multimédia, en particulier dans des secteurs où le traitement automatisé de l'information médicale est à haute valeur ajoutée compte tenu de la technicité des équipements, des traitements d'information et des contraintes importantes en terme de sécurité

[25] IDL : Interface Definition Language

pour le patient. Ceci concerne par exemple la préparation des traitements dans des domaines comme la neurochirurgie et la radiothérapie.

Ces modèles définissent d'une part les informations mises en jeu, et d'autre part les processus de traitement de ces informations, par des agents automatisés ou humains. Ces modèles ont deux finalités principales.

(1) Faciliter la construction de systèmes d'information ou d'équipements d'imagerie implémentant ces fonctions de traitement ou de communication ;

(2) Permettre l'élaboration de standards nationaux et internationaux pour l'inter-fonctionnement entre les composants (industriels) au sein de systèmes d'information intégrés.

Les méthodologies utilisables pour concevoir et formaliser ces modèles tendent elles aussi à se standardiser. Une méthode comme UML (Unified Modelling Language) permet d'accompagner de tels projets depuis la phase d'analyse des besoins (cas d'utilisation, modélisation des objets) jusqu'à l'implémentation des systèmes [Muller 97].

Depuis trois ans, nous avons tenté de promouvoir une telle démarche dans le contexte de la préparation des traitements en radiothérapie [Ducassou 98, Carlier 99]. La radiothérapie est une technique médicale de haute technicité qui met en jeu de nombreux équipements et de nombreux acteurs pour prescrire, spécifier, modéliser (calcul de dose), délivrer les traitements et évaluer leur efficacité. C'est également une discipline où la sécurité du patient est constamment en jeu, d'une part parce qu'une dose insuffisante permet à la tumeur de continuer à se développer, et d'autre part une dose excessive peut mettre en danger la vie du patient. La précision requise est donc importante. De ce fait le rôle de l'image dans ces prises en charge va grandissant, à la fois pour définir la cible du traitement, appréhender l'anatomie du patient et en tenir compte dans le calcul dosimétrique. Ainsi l'image est au cœur des nouvelles techniques de simulation (simulation virtuelle) et de traitement. La numérisation des appareils de traitement devient elle aussi incontournable pour gérer les multiples paramètres issus de la phase de spécification (positionnement des faisceaux, collimateurs multi-lame, etc.). Dans ce contexte se pose bien évidemment le problème de la gestion cohérente des informations au sein de ces unités, ainsi que celui de l'interopérabilité entre les différents équipements mis en jeu. Le standard DICOM a abordé ce problème mais de façon limitée en spécifiant un nombre limité d'entités d'information comme les Plans de Traitement, les Images de Radiothérapie, mais sans vision globale des problèmes de gestion d'information. Le travail que nous avons initié dans ce cadre avec nos partenaires du Centre Régional de Lutte Contre le Cancer vise à élaborer un modèle pour la gestion des informations de radiothérapie. Ce modèle pourra être utilisé, d'une part pour aider à conduire une politique d'informatisation, et d'autre part pour initier une réflexion vers un modèle de référence, pouvant, à terme, être utilisé pour définir des standards pour les échanges d'information dans ces services. Des contacts ont d'ores et déjà été noués avec d'autres équipes pour travailler en ce sens.

Une approche similaire me semble devoir être conduite dans le domaine de la préparation de gestes chirurgicaux. Il s'agit là aussi de mieux garantir l'interopérabilité des équipements mis en jeu dans le traitement des images anatomiques et fonctionnelles, la préparation et le guidage du geste chirurgical (systèmes robotiques ou de neuronavigation) et la rédaction de comptes-rendus opératoires multimédia.

2.3.1.3. Elaboration de standards

Les standards aujourd'hui disponibles dans le domaine de l'imagerie médicale ont été produits par le comité ACR/NEMA, aujourd'hui appelé comité DICOM. Ils couvrent l'ensemble du domaine de l'imagerie et la quasi-totalité des modalités d'imagerie existantes. Comme on l'a vu, ce comité s'est intéressé à partir de 1995 à d'autres aspects de la gestion des images, et notamment à des documents médicaux comme des comptes-rendus structurés. Le standard DICOM fait aujourd'hui l'objet d'un large consensus. Fait significatif, lors de la création du Comité TC 215 "Healthcare Informatics" de l'ISO en 1998, il n'a pas été jugé souhaitable de créer un groupe de travail spécifique pour l'imagerie biomédicale, et une liaison forte avec le comité DICOM a été établie pour la poursuite de la standardisation dans ce domaine.

Malgré cet indiscutable succès, la standardisation en imagerie médicale se trouve aujourd'hui face à des choix stratégiques difficiles. En effet DICOM avait fait en 1993 le choix d'une syntaxe spécifique (formats d'images et formats de messages) et de mécanismes d'échange également spécifiques. Etant donné l'importance croissante des technologies internet/intranet (messagerie, XML, etc.) et d'autre part le ralliement unanime des autres organismes de standardisation (CEN TC 251, HL7 notamment) vers ces technologies [CEN-HL7 agreement 00], on peut penser que le comité DICOM ne pourra plus rester longtemps sur sa ligne traditionnelle. Une évolution est amorcée depuis un an avec l'adoption du supplément 54 qui vise à permettre le transfert d'images au format

DICOM dans des messages MIME ; ce supplément propose à l'IETF[26] la reconnaissance d'un nouveau type de données `application/dicom` permettant la reconnaissance explicite des images DICOM dans les systèmes de messagerie [DICOM S54 00]. La société Etiam a joué un rôle clé dans cette évolution.

De façon plus fondamentale la question posée aujourd'hui est de savoir si le standard DICOM Structured Reporting (SR) doit être utilisé avec la syntaxe DICOM traditionnelle ou si le comité DICOM doit promouvoir lui-même une implémentation en XML, (sous la forme d'une DTD[27]) de façon à éviter de voir fleurir de façon anarchique de multiples traductions incompatibles entre elles.

Ma conviction personnelle est que le comité DICOM aurait du faire l'effort de mieux séparer dans le supplément SR les aspects de modélisation des entités mises en jeu et les aspects de représentation liés à l'utilisation d'une syntaxe particulière (la syntaxe DICOM, en l'occurrence). Cette position est celle que j'avais proposée au sein de l'équipe projet 34 du CEN. En effet une telle séparation paraît indispensable pour faciliter les discussions entre les différents groupes de standardisation (CEN, HL7, CORBAmed) dans la recherche d'une harmonisation des modèles, unanimement souhaitée [Bidgood 97, Jagannathan 98].

2.3.2. Intégration de systèmes

L'évolution technologique dans le domaine des systèmes d'information dénote deux tendances très marquées :

(1) la généralisation des technologies intranet/internet,

(2) le développement continu (sinon la maturité) des technologies basées sur des composants : CORBA (OMG), COM (Microsoft).

Sur un plan plus théorique, on a vu apparaître le concept de "système d'information coopératif". Ce terme recouvre des principes architecturaux tendant à insérer entre le niveau applicatif et la couche de gestion des données (bases de données, systèmes de communication) une couche intermédiaire, composée de "médiateurs" et de "facilitateurs" dont le rôle est de faciliter la recherche des informations pertinentes pour un composant de l'application ou l'utilisateur lui-même. Ces principes procèdent d'une philosophie "pragmatique", pour faciliter l'intégration de composants hétérogènes et augmenter le caractère adaptatif et facilement reconfigurable du système global, propriété indispensable dans le contexte actuel d'évolution rapide des besoins [Mylopoulos 97, Wiederhold 97].

Ces tendances dessinent une nouvelle façon d'envisager le problème de l'intégration de sous-systèmes hétérogènes (Figure 8). Elle se fonde sur deux aspects principaux.

Le premier aspect est l'émergence de plateformes homogènes d'accès à l'information, de type "navigateurs", aujourd'hui limités à l'accès à des pages HTML et à l'exécution d'applets Java, mais voués demain à l'affichage et au traitement de documents structurés XML. Ces plateformes serviront de support pour l'ensemble des interactions de l'utilisateur avec le système d'information, brisant ainsi le lien traditionnel des postes de travail avec tel ou tel sous-système. L'accès au système pourra être personnalisé et on peut penser que cette personnalisation ne résultera pas d'une configuration locale (qui serait alors statique) mais relèvera d'un service de médiation global, capable de prendre en compte le métier ainsi que les différents rôles de l'utilisateur et de gérer tout un contexte de consultation ou de travail, transversal par rapport aux applications. La notion de portail XML est vouée à se généraliser en tant que structure d'accueil, aussi bien du point de vue de l'interface intégré d'accès aux services, que de technologie support pour l'articulation cohérente des composants de médiation [Declerfayt 99].

Le second aspect concerne l'interopérabilité accrue des applications, grâce à des agents de "médiation" et de "facilitation" capables de partager des ontologies ou de traduire les données relevant d'ontologies qu'on aura pu rapprocher (mapping). Ces agents permettront de donner un caractère plus déterministe aux recherches effectuées par les utilisateurs ou les applications et donc de remédier au problème de confiance que l'utilisateur peut accorder ou non à des informations recueillies auprès de sous-systèmes hétérogènes (pertinence, complétude). Ils permettront également de gérer une distribution intelligente de l'information, du type de celle mise en œuvre dans la plateforme RITHME dans le cadre du projet ISAR-Telematics [Beuscart 99].

---

[26] IETF : Internet Engineering Task Force

[27] DTD : Document Type Definition

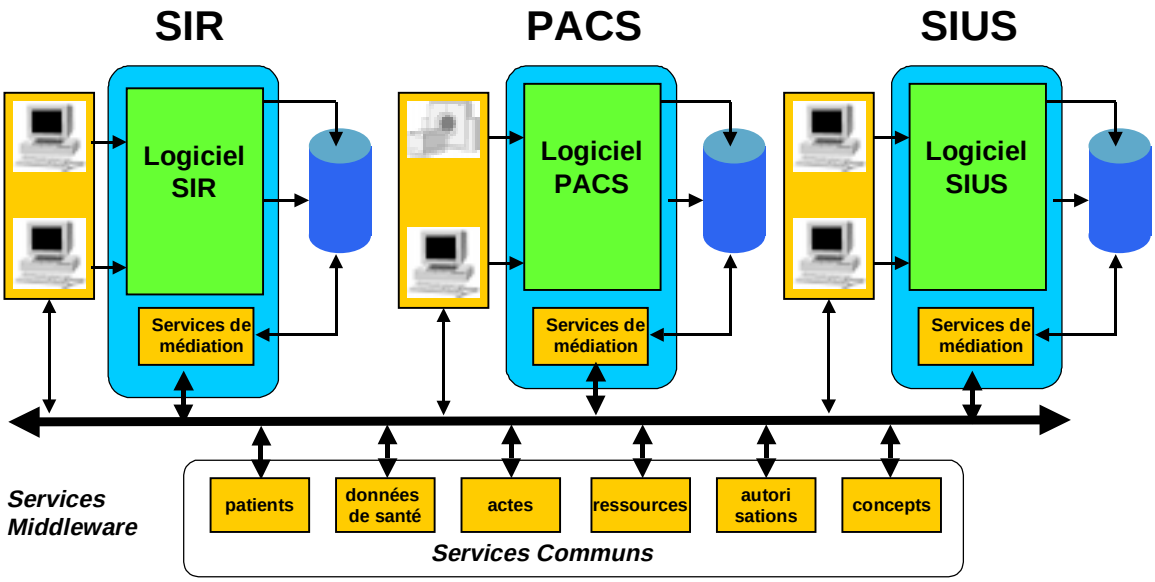


Figure 8. Intégration fondée sur des plateformes homogènes d'accès et des agents de médiation

Est-ce à dire que ces agents de médiation vont se substituer aux composants d'un middleware applicatif de type HISA ? On peut se poser la question mais cela nous semble peu probable, pour deux raisons. D'abord il existe manifestement des services totalement transversaux, comme par exemple le service d'identification et de gestion des patients. Pour ce qui concerne la gestion des dossiers patients et l'accès aux données médicales, il paraît également indispensable qu'il existe un tel service "global", quitte à ce que celui-ci ne contrôle en fait qu'un sous ensemble des données, le reste étant détenu au niveau des sous-systèmes et récupéré "à la demande" via des services de médiation. L'autre raison est de nature industrielle. Comment une offre industrielle pourrait-elle se développer sans qu'existe au préalable une infrastructure solide de composants globaux (de type services HISA), capables de répertorier et de gérer les ressources, les ontologies, de piloter une politique de sécurité, autant de choses indispensables au déploiement des agents de médiation.

Un exemple tout à fait représentatif de ce que pourraient être les agents de médiation est fourni par des travaux menés dans le cadre du groupe d'intérêt spécial de HL7 sur la notion de partage d'un "contexte clinique commun" entre plusieurs applications. Il s'agit de permettre à plusieurs applications de se synchroniser au niveau d'un "point d'utilisation", typiquement situé au niveau du poste de travail d'un utilisateur. L'utilisateur contrôle les paramètres de ce contexte (identité du patient étudié, identité de l'utilisateur, etc.) qui conditionnent étroitement le comportement des applications ainsi synchronisées [HL7 CMA 99].

2.3.3. Qualité de service dans les systèmes d'imagerie

La mise en place de systèmes d'information dans le domaine de la santé se heurte à de nombreuses difficultés dont certaines sont liées à des spécificités du domaine médical : sécurité et confidentialité des données, contraintes de disponibilité de l'information, etc., autant de facteurs très contraignants quand il s'agit de réaliser des systèmes intégrés (sur le plan fonctionnel), distribués et hétérogènes (sur les plans matériel et logiciel).

Dans ce contexte, l'avènement des technologies issues de l'internet, peu coûteuses car non spécifiques du domaine médical, est susceptible d'apporter des solutions nouvelles. Leur déploiement dans le cadre d'applications médicales ne doit néanmoins pas ignorer les spécificités de ce domaine, rappelées ci-dessus, faute de quoi celui-ci serait immanquablement condamné à l'échec. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine des communications. La généralisation des protocoles de type TCP/IP en mode "on fait au mieux" (best effort) peut apparaître comme une solution simple et uniforme pour l'ensemble des communications de données médicales, en intra et en inter-établissement, quel que soit le type d'application visé (transfert par messagerie de résultats d'examens, partage d'éléments du dossier médical, demande d'avis en temps réel, visiostaff, etc.). Or il s'avère en pratique que certaines des applications précédentes ne peuvent être déployées de façon satisfaisante en l'absence de garanties en terme de qualité de service (QoS). Par exemple la pratique du télécurseur lors d'une demande

d'avis en temps réel (désignation synchrone d'une zone d'intérêt par les protagonistes de l'échange) suppose que le débit du réseau soit suffisant et que le délai d'affichage du curseur puisse être contrôlé, faute de quoi l'interprétation par le destinataire des déplacements de curseur peut s'avérer erronée. Des contraintes similaires se font jour chaque fois qu'un transfert de données exige un certain degré de synchronisme entre émetteur et destinataire (transfert de la voix, de la vidéo, télé-pilotage d'un geste, voire télé-acquisition de données médicales). La solution à ce type de problème passe par la gestion cohérente de l'ensemble des paramètres qui concourent à la qualité de service : cryptage des informations pour répondre aux besoins de sécurité et de confidentialité, codage optimal des données (images, sons, vidéo) en fonction des critères de qualité admissibles (au sens de l'application) et des ressources de communication disponibles au niveau du réseau.

A long terme il ne fait pas de doute que des solutions génériques (c'est à dire non spécifiques du domaine médical) permettront de répondre à ces besoins car ils se rencontrent également dans d'autres domaines d'activité. En attendant celles-ci, un travail d'analyse apparaît aujourd'hui nécessaire pour définir les contraintes de QoS relatives aux applications médicales [CEN QoS 98] et pour proposer des solutions capables d'y répondre. Des travaux en ce sens ont été initiés en 1998 avec la création du groupe THELEME (pour télémédecine) : la réflexion porte plus spécifiquement sur les aspects de distribution de résultats d'imagerie, de gestion de visiostaffs, de gestion de la disponibilité pour différents partenaires d'éléments du dossier médical, notamment dans un contexte d'archivage à distance des dossiers (téléarchivage), domaines pour lesquels nous disposons déjà d'une certaine compréhension des problèmes, grâce aux acquis du modèle MIMOSA.

2.4. Références

[Acr-Nema 85] ACR-NEMA Standards publication n°300-1985, Washington D.C., ACR-NEMA, 1985.

[Acr-Nema 88] ACR-NEMA Standards publication n°300-1988, Washington D.C., ACR-NEMA, 1988.

[Acr-Nema 93] ACR-NEMA Standards, Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM), publication n°PS3.1-9, 1993.

[Arenson 82] Arenson R.L., Morton D.E., London J.W. : Fiber optic communication system for medical images. SPIE Vol 318, PACS I, 74-79, 1982.

[Arenson 83] Arenson R.L., Morton D.E., London J.W.: Early experience with fiber optic PACS for medical images. SPIE Vol 418, PACS II, 116-121, 1983.

[Aubry 96] Aubry F., Bizais Y., Chabriais J., Chameroy V., Di Paola R., Garfagni H., Gibaud B., Klipfel B., Parisot C., Pavageau E., Todd Pokropek A.: The MIMOSA model for the management of medical images in an open system architecture. Computer Assisted Radiology 96, Paris, Edited by H.U. Lemke, M.W. Vannier, K. Inamura and A.G. Farman, Elsevier, 1021-1026, 1996.

[Aubry 91] Aubry F., Bizais Y., Gibaud B., Forte A.M., Chameroy V., Di Paola R., Scarabin J.M. : An object-oriented model for medical image data: Medical Imaging V, San Diego (USA), SPIE Vol 1446, 168-178, 1991.

[Bakker 86] Bakker A.R., Didden H., de Valk J.P.J., Massar A.D.A. : Considerations on an algorithm for activation of images in a multi-layered storage system within a PACS, SPIE Vol. 626, 637-640, 1986.

[Baxter 82] Baxter B.S., Hitchner L.E. and Maguire Jr. G.Q. : A standard format for digital image exchange, American Association of Physicists in Medicine Series, Report n°10, N.Y., N.Y., 11p, 1982.

[Best 92] Best D.E., Horii S.C., Bennett W. and Parisot C. : Update of the ACR/NEMA Digital Imaging and Communication in Medicine Standard, SPIE Medical Imaging VI, PACS Design and Evaluation, Vol 1654, 356-361, 1992.

[Beuscart 99] Beuscart R., Renard J.M., Delerue D., Souf A. : Telecommunication in heathcare for a better coordination between hospitals and GPs: routine application of the "ISAR-Telematics" project, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 3, n°2, 101-108, 1999.

[Bidgood 97] Bidgood W.D.Jr., alSafadi Y., Tucker M., Prior F., Hagan G., Mattison J.E. : The role of DICOM in an evolving Healthcare computing environment: the model is the message, *Journal of Digital Imaging*, 11, 1-9, 1998.

[Bizais 91a] Bizais Y., Gibaud B., Forte A.M., Aubry F., Di Paola R., Scarabin J.M. : A qualitative approach to medical image databases: Medical Imaging V, San Diego (USA), SPIE Vol 1446, 156-167, 1991.

[Bizais 91b] Bizais Y., Aubry F., Gibaud B., Scarabin J.M., Di paola R. : A comprehensive model for medical image data bases, Meeting COMAC-BME, avril 89, Aveiro (Portugal), ISCAMI 1, Ed by J. Demongeot & A. Sousa Pereira, Springer Verlag, 73-81, 1991.

[Bizais 94] Bizais Y., Aubry F., Chameroy V., Gibaud B., Lavaire F., Garfagni H., Todd-Pokropek A., Ratib O., Di Paola R. : Image kernel of MIMOSA medical imaging model. Medical Imaging VIII, Newport Beach (USA), Feb 1994, SPIE Vol 2167, 513-524, 1994.

[Blaine 83] Blaine G.J., Hill R.L., Cox J.R., Jost R.G.: PACS workbench at Mallinckrodt Institute of Radiology (MIR). SPIE Vol 418, PACS II, 80-86, 1983.

[Booch 92] Booch G. : Conception orientée objets et applications, Addison-Wesley, 1992.

[Boxer 98] Boxer P. and Cohen B. : Analysing the lack of demand organisation, in Computing Anticipatory Systems (ed. D. Dubois), American Inst. Of Physics Conference Proceedings 437, 157-181, 1998.

[Bulatek 83] Bulatek D.E., O'Connell S.B.: Working PACS prototype. SPIE Vol 418, PACS II, 144-111, 1983.

[Carlier 99] Carlier T. : Vers un modèle de référence pour la gestion des informations en radiothérapie, Mémoire de DEA "Rayonnements et Imagerie en médecine", 1999.

[CEN ENV 12265 95] ENV 12265, Medical informatics - Electronic healthcare record architecture, CEN TC 251 Health Informatics, 1995.

[CEN ENV 12922 97] ENV 12922-1 Medical Image Management - Part 1: Storage Commitment Service Class, CEN TC 251 Health Informatics, 1997.

[CEN ENV 12967 98] ENV 12967-1, Medical Informatics - HISA: Healthcare Information Systems Architecture - Part 1:Healthcare Middleware Layer, CEN TC 251 Health Informatics, 1998.

[CEN ENV 13606 99] ENV 13606 1-4, Health informatics - Electronic healthcare record communication - Part 1: Extended architecture ; Part 2: Domain termlist ; Part 3: Distribution rules ; Part 4: Messages for the exchange of information, CEN TC 251 Health Informatics, 1999.

[CEN ENV PT20 95] Digital Imaging and Communications (MEDICOM/DICOM), Supplement 10, "Basic Worklist Management", CEN TC251, PT 020, Text for letter ballot, october 1995.

[CEN PT34 99] Health Informatics - Interoperability of healthcare multimedia report systems, CEN Report, 1999.

[CEN-HL7 agreement 00] Memorandum of understanding on intensifying the collaboration between CEN/TC251 and HL7, CEN/TC251/N00-022, March 2000.

[CEN QoS 98] Quality of Service requirements for Healthcare Information Interchange, CEN Report, 1998.

[Chao 95] Chao W., Ho B.K.T., Chao J.T., Sadri R., Huang L., Taira R. : Implementation of system intelligence ina 3-tier tele-medicine PACS hierarchical storage management system, SPIE Vol. 2435, 423-429, 1995.

[Chen 95] Chen D.T., Ho B.K.T., Chao W., Taira R., Bentson J. : PACS intelligence: automatic feedback for PACS retrieval requests, SPIE Vol. 2435, 452-461, 1995.

[Chunn 97] *Healthcare Informatics* 1997 Oct;14(10):IR12-4., http://www.infotivity.com/chunn.htm.

[Cohen 95] Cohen B. : On models and modelling frameworks in Healthcare Information Systems Standards, Proceedings AHCPR Conference on Medical Records and modelling, Boston, NTIS PB96-187620, 1995.

[Cohen 97] Cohen B. : Set Theory as a semantic framework for object oriented modelling, Proceedings ECOOP'97, Workshop on precise semantics for OO modeling techniques, TUM-I9725, 61-68, Technical University of Munich, 1997.

[Cordonnier 96] Cordonnier E., Hervault B., Gibaud B., Lussot E., Gandon Y., Meunier C., Klipfel B.: Gradual evolution from a PACS prototype to an open industrial system. Computer Assisted Radiology 96, Paris, Edited by H.U. Lemke, M.W. Vannier, K. Inamura and A.G. Farman, Elsevier, 429-434, 1996.

[Covvey 99] Covvey H.D., Stumpf J.J., A new architecture for enterprise information systems. Proceedings AMIA symposium, 726-730, 1999.

[Cox 82] Cox J.R., Blaine G.J., Hill R.L., Jost R.G.: Study of a distributed PACS for radiology. SPIE Vol 318, PACS I, 133-142, 1982.

[Creasy 86] Creasy J.L., Loendorf D.D., Hemminger B.M. : Initial experience with a prototype storage system at the University of North Carolina, SPIE Vol. 626, 631-636, 1986.

[Cywinski 83] Cywinski J.K., Cywinski L.M., Lee L.: Medical image distribution, storage and retrieval network: the M/NET. SPIE Vol 418, PACS II, 74-79, 1983.

[Day 83] Day J.D. and Zimmermann H. : The OSI Reference Model, *Proceedings of the IEEE*, Vol 71, 2, 1334-1340, 1983.

[Declerfayt 99] Declerfayt O. : Portails XML dans le domaine de la santé http://www.cediti.be/sequoia/afuu/Sequoia_afuu.html, 1999.

[De Valk 92] de Valk J.P.J. : *Integrated diagnostic imaging - Digital PACS in medicine*, Elsevier 1992.

[Dicom S23 00] DICOM Standards Committee, Supplement 23: Structured Reporting Storage SOP Classes, 2000.

[Dicom S52 00] DICOM Standards Committee, Supplement 52: Interpretation Worklist (draft), 2000.

[Dicom S54 00] DICOM Standards Committee, Supplement 54: DICOM MIME Type, 2000.

[D'Lugin 90] D'Lugin J.J., Boehme J.M., Choplin R.H., Maynard C.D., Wolfman N.T. : Optimization of image transfer from the central archive to workstations in a Picture Archiving and Communications System (PACS), SPIE Vol. 1234 Medical Imaging IV, 398-405, 1990.

[D'Silva 88] D'Silva V., Perros H., Stockbridge C. : A simulation model for PACS, SPIE Vol 914, 940-946, 1988.

[Ducassou 98] Ducassou M. : Analyse et modélisation d'un système d'information en radiothérapie, Mémoire de DEA "Rayonnements et Imagerie en médecine", 1998.

[Duerinckx 82] Duerinckx A.J., Pisa E.J. : Filmless picture archiving and communication in diagnostic radiology, SPIE Vol. 318, 9-18, 1982.

[Dwyer 82a] Dwyer III S.J., Templeton A.W., Martin N.L., Cook L.T., Lee K.R., Levine E., Batnitzky S., Preston D.F., Rosenthal S.J., Price H.I., Anderson W.H., Tarlton M.A., Faszold S.: Cost of managing digital disgnostic images for a 614 bed hospital. SPIE Vol 318, PACS I, 3-8, 1982.

[Dwyer 82b] Dwyer III S.J., Templeton A.W., Anderson W.H., Tarlton M.A., Hensley K.S., Lee K.R., Preston D.F., Batnitzky S., Levine E., Rosenthal S.J., Martin N.L., Cook L.T.: Salient characteristics of a distributed diagnostic imaging management system for a radiology department. SPIE Vol 318, PACS I, 194-204, 1982.

[Fisher 88]Fisher P.D., Brauer G.W., Hughes P.J., Lyle J.M. : Clinically-based archive model for a PACS, SPIE Vol 914, 1097-1104, 1988.

[Fontaine 96] Fontaine B., Kornblum C., Maitre F., Mazoyer B. et Weil G. : L'interopérabilité des logiciels hospitaliers : aspects techniques, CIHS, 1996.

[Forte 95] Forte A.M., Lefèvre J.E., Cazier L., Becker J., Vu Thanh H., Allouche R. : MYRIAM, PACS project for the Assistance Publique - Hôpitaux de Paris. Computer Assisted Radiology, Berlin, Edited by H.U. Lemke, K. Inamura, C.C. Jaffe and M.W. Vannier, Springer Verlag, 528-533, 1995.

[Frandji 94] Frandji B., Schot J., Joubert M., Soady I. and Kilsdonk A. : The RICHE Reference Architecture, Medical Informatics, Vol 19, 1-11, 1994.

[Gane 79] Gane C.and Sarson T. : Structured systems analysis: tools and techniques, Prentice Hall, 1979.

[Garfagni 94] Garfagni H., Gibaud B., Stut W., Aubry F., Bizais Y.: A functional model of the management of medical images. *Medical Informatics*, Vol. 19(2), 95-108, 1994.

[Garfagni 96] Garfagni H. : Contribution à un modèle de référence pour la gestion des images médicales : application à la standardisation en imagerie médicale, Thèse de doctorat d'Université, Université de Rennes I, 1996.

[Gibaud 89a] Gibaud B., Picand F., Benslimane A., Grassin P., Urbano L., Toumoulin C., Fresne F., Rouvière M., Scarabin J.M. : SIRENE: Design and evaluation of a PACS prototype, CAR 89, Berlin RFA, Springer Verlag Ed., 484-488, 1989.

[Gibaud 89b] Gibaud B., Aubry F., Bizais Y., Di Paola R., Scarabin J.M. : Towards comprehensive specifications of medical imaging data bases, First Int. Conf. IMAC, Washington, 1989 (Poster et Abstract).

[Gibaud 90] Gibaud B., Rodriguez-Pereira S., Benslimane A., Scarabin J.M. : A distributed approach for the development of integrated applications in PACS: Medical Imaging IV, Newport Beach (USA), SPIE Vol 1234, 568-577, 1990.

[Gibaud 91] Gibaud B., Toumoulin C., Scarabin J.M.: PACS activities at the University Hospital of Rennes, in *PACS in medicine*, NATO ASI series, Vol. F74, H.K. Huang et al., (eds.), Springer Verlag Berlin Heidelberg, 263-265, 1991.

[Gibaud 92] Gibaud B., Bizais Y., Morcet N., Gandon Y., Buhé T., Forte A.M., Aubry F., Chabriais J., Chameroy V., Di Paola R., Ratib O., Todd Pokropek A., Kanz R., Guitel M., Vital D., Ramond J.P.: Toward modelling image management in PACS: Lessons from a preliminary review of end-users requirements. IEEE EMBS, Paris, 1202-1203, 1992.

[Gibaud 93a] Gibaud B., Morcet N., Gandon Y.: Les systèmes de communication et d'archivage d'images : Bilan de dix années d'expérimentations et perspectives. *Annales de Radiologie*, Vol 36(6/7), 1993, 412-424.

[Gibaud 93b] Gibaud B., Scarabin J.M., Gandon Y.: PACS Evolution between 1980 and 2000, in "*Integrated Diagnostic Imaging: Digital PACS in Medicine 1980-2000*", J.P.J. de Valk Ed., Elsevier Science Publishers, 175-200, 1993.

[Gibaud 95] Gibaud B., Gandon Y., Garfagni H., Hervault B., Lussot E., Barès B., Klipfel B., Bourgeois L., Quideau J.C. : Assessment of the MIMOSA model: experience learned from the development of a demonstrator. Medical Imaging 95, San Diego (USA), SPIE Vol 2435, 355-367, 1994.

[Gibaud 96a] Gibaud B., Hervault B., Cordonnier E., Lussot E., Gandon Y., Meunier C., Klipfel B.: Transition d'un prototype PACS vers un système industriel ouvert multi-constructeurs. *Revue Européenne de Technologie Biomédicale*, Vol. 18(5), 137-144, 1996.

[Gibaud 96b] Gibaud B., Garfagni H. : Management of worklists in medical imaging: modelling issues, CAR'96, Lemke H.U., Vannier M.W., Inamura K., Jaffe C. C. and Farman A.G. Ed., Elsevier, Amsterdam, 435-439, 1996.

[Gibaud 97] Gibaud B., Hervault B. : Image management in PACS : which decomposition into well-defined and interoperable industrial products ? *Medical Informatics* Vol. 22(4), 315-324, 1997.

[Gibaud 98] Gibaud B., Garfagni H., Aubry F., Todd Pokropek A., Chameroy V., Bizais Y. and Di Paola R. : Standardisation in the field of medical image management : the contribution of the MIMOSA model, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 17(1) 62-73, 1998.

[Glicksman 92] Glicksman R.A., Wilson D.L., Perry J., Prior F.W. : Architecture of a high performance PACS based on a shared File system, SPIE Vol. 1654 Medical Imaging VI, 158-168, 1992.

[Glicksman 93] Glicksman R.A., Prior F.W., Wilson D.L. : Image management within a PACS, SPIE Vol. 1899, 157-164, 1993.

[Greinacher 88] Greinacher C.F.C., Herbst A.J., Ihringer M., List E., Offenmuller W., Prior F., Retter K., Rienhoff O. : A detailed RIS/PACS interface specification based on the Marburg model, *Lecture Notes in Medical Informatics* n°37, O. Rienhoff, C.F.C. Greinacher (Eds), Springer-Verlag, 39-88, 1988.

[Grimson 98] Grimson J., Grimson W., Berry D., Stephens G., Felton E., Kalra D., Toussaint P., Weier O.W. : A CORBA-based integration of distributed electronic healthcare records using the Synapses approach, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 2, n°3, 124-138, 1998.

[Herbst 88] Herbst A.J., Retter K. : The Marburg model, *Lecture Notes in Medical Informatics* n°37, O. Rienhoff, C.F.C. Greinacher (Eds), Springer-Verlag, 25-38, 1988.

[HL7 CMA 99] Context Management Specification Technology- and Subject-Independent Component Architecture Version CM-1.0, 1999.

[Horii 83] Horii S.C., Schimpf J.H., Maguire G.Q., Zeleznik M.P., Noz M.E.: Broadband coaxial cable image viewing and processing for radiology. SPIE Vol 418, PACS II, 247-257, 1983.

[Huang 83a] Huang H.K., Barbaric Z., Mankovich N.J., Moler C.: Digital radiology at the University of California, Los Angeles: a feasibility study. SPIE Vol 418, PACS II, 259-265, 1983.

[Huang 83b] Huang H.K., Mankovich N.J., Barbaric Z., Kangarloo H., Moler C.: Design and implementation of multiple digital viewing stations. SPIE Vol 418, PACS II, 189-198, 1983.

[Huang 92] Huang H.K., Taira R.K. : Infrastructure design of a Picture Archiving and Communication System, *American Journal of Radiology*, 158, 743-749, 1992.

[Ingenerf 99] Ingenerf J. : Telemedicine and terminology: different needs of context information, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 3, n°2, 92-100, 1999.

[Jagannathan 98] Jagannathan V., Wreder K., Glicksman R., Alsafadi Y. : Objects in Healthcare – focus on standards, ACM Standards View, Summer 98.

[Kasday 86] Kasday L.R. : Human factors considerations in PACS design, SPIE Vol. 626, 581-592, 1986.

[Kinsey 00] Kinsey T.V., Horton M.C., Lewis T.E. : Interfacing the PACS and the RIS: result of a 5-year implementation, *Radiographics*, Vol. 20, 883-891, 2000.

[Leisch 97] Leisch E., Sartzetakis S., Tsiknakis M., Orphanoudakis S.C. : A framework for the integration of distributed autonomous healthcare information systems, Medical Informatics, Vol 22, n°4 325-335, 1997.

[Levin 90] Levin K., Fielding R. : Methods to prefetch comparison images in image management and communication systems (IMACS), SPIE Vol. 1234 Medical Imaging IV, 270-274, 1990.

[Liu Sheng 90a] Liu Sheng O.R., Chen Garcia H.M., Wei C.P., Ozeki T., McNulty P.: Distributed database design and modelling for PACS, SPIE Vol. 1234 Medical Imaging IV, 256-269, 1990.

[Liu Sheng 90b] Liu Sheng O.R., Wang H., Chen Garcia H.M. : IRES - Image Retrieval Expert System, SPIE Vol. 1234 Medical Imaging IV, 832-841, 1990.

[Liu Sheng 92a] Liu Sheng O.R., Wei C.P., Chen Garcia H.M. : Design and implementation of a distributed PACS database system, SPIE Vol. 1654 Medical Imaging VI, 191-202, 1992.

[Liu Sheng 92b] Liu Sheng O.R., Wei C.P., Ozeki T., Ovitt T., Ishida J. : Design of a knowledge-based image retrieval system : implications from radiologists' cognitive processes, SPIE Vol. 1654 Medical Imaging VI, 243-254, 1992.

[Liu Sheng 94] Liu Sheng O.R., Hu P.J.H., Wei C.P. : Acquisition and validation of image retrieval knowledge, SPIE Vol. 2165, 714-725, 1994.

[Liu Sheng 95] Liu Sheng O.R., Chang N., Wei C.P., Hu P.J.H. : Induction of image retrieval knowledge from radiologists' reading instances, SPIE Vol. 2435, 52-60, 1995.

[Maguire 82] Maguire G.Q., Zeleznik M.P., Horii S.C., Schimpf J.H., Noz M.E.: Image processing requirements in hospitals and an integrated systems approach. SPIE Vol 318, PACS I, 206-213, 1982.

[Maguire 86] Maguire G.Q.: Looking back at PACS attempts- What has happened since PACS I: NATO ASI Series Vol F19, *Pictorial Information systems in medicine*. Edited by K.H. Höhne, Springer Verlag, 391-399, 1986.

[Maguire 88] Maguire G.Q. : Picture Archiving and Communication Systems: Progress and current problems, NATO meeting "The formation, handling and evaluation of medical images", Povoa de Vazin (P), 1988.

[Maguire 91] Maguire Jr. G.Q. : Picture Archiving and Communications Systems: Progress and current problems. In NATO ASI Series, Series F: *Computer and Systems Sciences. Medical Images: Formation, Handling, and Evaluation*. A. Todd-Pokropek and M. A. Viergever (eds.), Springer-Verlag, Heidelberg, 259-276, 1991.

[Mankovich 88] Mankovich N.J., Taira R.K., Cho P.S., Huang H.K. : Operational radiologic image archive on digital optical disks, *Radiology*, Vol 167, n°1, 139-142, 1988.

[Martens 93] Martens F.J., van den Broeck R., Dicke P., List-Hellwig E., Ottes F.P., Rechid R., Schulz C.A., Stockmann M., van der Velde R., Verlinden E., et al, HIPIN--a generic HIS/RIS-PACS interface based on clinical radiodiagnostic procedures. *European Journal of Radiology*, 17(1), 38-42, 1993.

[Martinez 88a] Martinez R., Archwamety C. ; Image migration in a three level data base archive system, SPIE Vol. 914, 1122-1127, 1988.

[Martinez 88b] Martinez R., Nemat M. : Image database archive design using parallel architectures and expert system, SPIE Vol. 914, 1114-1121, 1988.

[Mattheus 92] Mattheus R. : The European community and its standardisation efforts in medical informatics, SPIE Medical Imaging VI, PACS Design and Evaluation, Vol 1654, 306-319, 1992.

[MDIS 90] Medical Diagnostic Imaging Support System, US Army Engineer Division, Acquisition Document, 1990.

[Meetz 99] Meetz K., Schmidt J., Wendler Th., Workflow models for radiology. CARS 1999, H.U. Lemke, M.W. Vannier, K. Inamura & A.G. Farman (Eds.) Elsevier Science, 417-421, 1999.

[Messerschmidt 96] Messerschmidt D.G. : The convergence of telecommunications and computing: what are the implications today ? *Proceedings of the IEEE*, Vol. 84, n°8, 1165-1186, 1996.

[Messerschmidt 99] Messerschmidt D.G. : The Prospects for Computing-Communications Convergence, Proceedings of MÜNCHNER KREIS, Conference "VISION 21: Perspectives for the Information and Communication Technology", Munich Germany, 1999.

[Meyer-Ebrecht 82] Meyer-Ebrecht D., Böhring D., Grewer R., Mönnich K.J., Schmidt J., Wendler Th. : Hierarchical approach to distributed picture information systems, SPIE Vol. 318, 112-116, 1982.

[Michard 99] Michard A. : XML : Langage et applications, Editions Eyrolles, 1999.

[MIMOSA 94] MIMOSA Final Report, MIMOSA deliverable, 1994.

[Mitra 99] http://www.mitra.com/products/broker/index.html

[Mohr 97] Mohr D.N. : Benefits of an electronic clinical information system. *The Journal of the Healthcare Information and Management Systems Society*, Vol. 11, N°4, 1997.

[Muller 97] Muller P.A. : Modélisation objet avec UML, Editions Eyrolles, 1997.

[Mylopoulos 97] Mylopoulos J., Papazoglou M., Cooperative Information Systems, *IEEE Expert Intelligent systems and their applications*, Vol 12, n°5, 28-31, 1997.

[Nicolas 97] Nicolas C., Avare C., Najman F., Java Client-serveur, Collection Fi System, Editions Eyrolles.

[Nijssen 89] Nijssen G.M. and Halpin T.A. : Conceptual schema and relational database design. A fact oriented approach, Prentice-Hall, New York, 1989.

[Oksala 94] Oksala S.P. : Standardization and conformity Assessment in Telecommunications and Information Technology, NIST/IITF Workshop on Standards Development and Information Infrastructure, june 1994.

[Prince 96] Prince V. : Vers une informatique cognitive dans les organisations ; le rôle central du langage, Editions Masson, 1996.

[Rector 98] Rector A.L., Zanstra P.E., Solomon W.D., Rogers J.E., Baud R., Ceusters W., Claassen W., Kirby J., Rodrigues J.M., Rossi Mori A., Van der Haring E.J., Wagner J. : Reconciling users'needs and formal requirements: issues in developing a reusable ontology in medicine, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 2, n°4, 229-242, 1998.

[Renoulin 87] Renoulin R., Scarabin J.M., Coatrieux J.L., Launay J.C., Babonneau G., Gibaud B. et al : The SIRENE Project, Proceedings CAR 87, Berlin, RFA, Springer Verlag, 525-531, 1987.

[Reynolds 00] Reynolds M. : Health Informatics, Short Strategic Study: Health Information Infrastructure, interim report, May 2000.

[Rossi Mori 98] Rossi Mori A., Consorti F. : Integration of clinical information across patient records: a comparison of mechanisms used to enforce semantic coherence, *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 2, n°4, 243-253, 1998.

[Saranummi 92] Saranummi N., Akisada M., Irie G., Kiuru A., Mattheus R., Okabe T., Olsson S., Viitanen T. : User requirements and standardization for PACS, Second Japan-Nordic PACS symposium, Computer methods and programs in biomedicine, 37, 237-245, 1992.

[Scarabin 83] Scarabin J.M., Gibaud B., de Certaines J., Coatrieux J.L.: Projet SIRENE, Serveur d'Imagerie médicale accessible via un Réseau Numérique Expérimental. Université de Rennes I, 1983.

[Sherman 88] Sherman A.B. : Storage model for PACS, SPIE Vol. 914, 1426-1431, 1988.

[Smith 92] Smith D.V., Smith S., Sauls F., Cawthon M.A., Telepak R.J. : Design strategy and implementation of the Medical Diagnostic Image Support system at two large military medical centers, SPIE Vol. 1654, 148-157, 1992.

[Stut 88] Stut W.J.J., Didden H.W., de Valk J.P.J., Bakker A.R. : Prediction and analysis of PACS performance with the simulation tool MIRACLES, *Medical Informatics*, Vol 13, n°4, 349-359, 1988.

[Stut 94] Stut W.J.J., Gibaud B., Hervault B., Mevel G. : Transforming PACS models into implementations. Medical Imaging VIII, Newport Beach (USA), SPIE Vol 2165, 659-670, 1994.

[Taira 88] Taira R.K., Mankovich N.J., Huang H.K. : One-year experience with a PACS module in pediatric radiology : system viewpoint, SPIE Vol. 914, 1046-1056, 1988.

[Taira 92] Taira R.K., Wong A.W.K., Stewart B.K., Huang H.K. : Design of a PACS Cluster Controller, SPIE Vol. 1654 Medical Imaging VI, 203-207, 1992.

[Thomas 82] Thomas A.J. : Pictorial information system architectures for diagnostic imaging, SPIE Vol. 318, 153-160, 1982.

[Toussaint 97] Toussaint P.J., Bakker A.R.,and Groenewegen L.P.J. : Integrating information systems in medicine: a reference model for middleware, *Medical Informatics*, Vol. 22, n°3, 227-235, 1997.

[Veazie 98] Veazie S.M. : Computer-based patient records can accelerate software component commerce. *Journal of Healthcare Information Management*, Vol 12, n°4, 21-28, 1998.

[WfMC 98] Workflow Management Coalition : Workflow and internet: catalyst for radical change, a WFMC White paper, http://www.wfmc.org, 1998.

[Wiederhold 97] Wiederhold G., Genesereth M. : The conceptual basis for mediation services, *IEEE Expert Intelligent systems and their applications*, Vol 12, n°5, 38-47, 1997.

[Wilson 94] Wilson D.L., Smith D., Rice B. : Intelligent prefetch strategies for historical images in a large PACS, SPIE, Vol. 2165, 112-123, 1994.

[Winsten 96] Winsten D., Carroll R.J., Childs B., Korpman R.A., Kowitt J.P., Taylor G.B., Optimizing clinical Information systems in complex computing environments. Healthcare Information Management, Vol 10, n°4, 47-58, 1996.

[Wong 92] Wong A.W.K., Taira R.K., Huang H.K. : Implementation of a digital archive center for a radiology department, SPIE Vol. 1654, 182-190, 1992.

[Wong 94] Wong A.W.K., Huang H.K., Arenson R.L., Yin L. : Automated prefetch mechanism: design and implementation for a radiology PACS, SPIE Vol. 2165, 102-111, 1994.

[Wong 95] Wong A.W.K., Huang H.K., Arenson R.L. : Hierarchical storage management: design and implementation for a distributed PACS, SPIE Vol. 2435, 61-67, 1995.

[Young 97] Young S.T., Chang J.S. : Implementation of a patient-centred and physician-oriented healthcare information system, *Medical Informatics*, Vol. 22, n°3, 207-214, 1997.

[Zeleznik 83] Zeleznik M.P., Maguire G.Q., Baxter B. : PACS data base design, SPIE PACS II Vol. 418, 287-295, 1983.

3. Représentation et gestion de connaissances numériques et symboliques associées aux images pour l'aide à la décision

3.1. Problématique et état de l'art

3.1.1. Contexte

La place de l'image dans la pratique neurologique et neurochirurgicale ainsi que dans de nombreuses disciplines de recherche relevant des neurosciences est chaque jour plus importante. Sur le plan clinique l'image intervient à la fois dans les processus diagnostiques et thérapeutiques. Au plan diagnostique elle joue un rôle capital dans la mise en évidence des lésions. Au plan thérapeutique son rôle est tout aussi important et concerne l'exploration de l'environnement anatomique et fonctionnel de la lésion de façon à aider le chirurgien à définir l'approche chirurgicale optimale, c'est à dire celle qui maximise les chances de guérison ou de rémission, tout en minimisant les risques de l'intervention. La reconnaissance de l'environnement fonctionnel est à ce titre particulièrement important. L'utilisation d'atlas anatomiques du cerveau [Talairach 88, Szikla 77, Schaltenbrand 77, Ono 91] facilite l'interprétation des images en apportant une connaissance a priori de l'anatomie cérébrale à partir de planches anatomiques issues de cerveaux *post-mortem* ou d'images anatomiques obtenues *in vivo*. Ces planches anatomiques servent de point de départ à une caractérisation textuelle ou graphique des structures anatomiques : morphologie, relations avec les structures voisines, rôle à l'intérieur d'un système fonctionnel, variabilité, etc.

Historiquement, les atlas visaient à pallier les insuffisances des techniques d'imagerie *in vivo*. Néanmoins, l'apparition de techniques performantes comme le scanner X ou l'IRM n'a pas fait disparaître le besoin d'atlas. Ceci tient principalement à trois raisons.

(1) La résolution spatiale et densitométrique des images reste limitée : par exemple les différents noyaux du thalamus ne peuvent être mis en évidence à l'IRM.

(2) Au delà de l'information anatomique, c'est également le *rôle fonctionnel* des territoires cérébraux qui intéresse le chirurgien, pour, par exemple choisir une voie d'abord ou évaluer les risques d'une intervention. Ces informations ont longtemps été inaccessibles aux techniques d'imagerie et c'est pourquoi il était intéressant de recourir à des atlas, capables de fournir ce type d'informations.

(3) L'utilisation des atlas a beaucoup concerné la communauté scientifique qui travaille sur la cartographie des fonctions cérébrales (imagerie TEP et TEMP). En effet, compte tenu de la faible résolution spatiale de ces techniques d'imagerie fonctionnelle et de l'incertitude introduite par le recalage avec les données IRM du sujet, il était souvent plus simple d'interpréter ces images par l'intermédiaire d'un atlas comme l'atlas de Talairach. Une seconde raison tient au fait que les études TEP ne pouvant être reproduites un grand nombre de fois chez un sujet, on ne peut obtenir des résultats statistiquement significatifs qu'en comparant des cartographies fonctionnelles obtenues chez différents patients. De ce fait un modèle comme celui de Talairach s'est imposé comme moyen de fusion de résultats obtenus chez différents patients, ainsi que comme support pour la présentation et la comparaison des résultats entre les différentes équipes.

Le développement de l'imagerie fonctionnelle et l'accès de plus en plus facile à ces techniques d'exploration (TEP, IRMf et dans une moindre mesure MEG) modifient quelque peu les données du problème. En effet ces techniques permettent aux cliniciens et aux chercheurs d'explorer *directement* les fonctions cérébrales des patients ou des sujets. Ceci permet d'étudier au cas par cas les rapports anatomie / fonction, alors que les techniques traditionnelles obligeaient à analyser l'information fonctionnelle de façon globale, moyennée au niveau de populations de sujets. Ceci dit, les performances et la fiabilité de l'imagerie fonctionnelle restent encore limitées : résolution spatiale et temporelle faible pour l'IRMf et la TEP, incertitudes sur le caractère significatif des zones activées pour l'IRMf (phénomènes hémodynamiques, artefacts vasculaires), incertitudes sur la fiabilité des générateurs reconstruits en MEG (problème de reconstruction des sources sous-déterminé). Ces limitations font que le recours et la comparaison à des données de référence demeurent particulièrement indiqués, ce qui donne un regain d'intérêt au concept d'atlas anatomique et fonctionnel.

Tous ces éléments font que le concept d'atlas a beaucoup évolué au cours des 15 dernières années et c'est cette évolution que nous souhaitons rappeler ici en citant les travaux qui nous ont paru les plus significatifs. En préalable il n'est pas inutile de rappeler la fonction principale (initiale) d'un atlas et d'expliciter les possibilités nouvelles apportées par l'outil informatique par rapport au concept traditionnel d'atlas (sur un support papier).

3.1.2. Potentialités des atlas numériques

L'utilisation d'un atlas a pour but d'aider l'interprétation de données cliniques anatomiques et fonctionnelles relatives à un sujet en les éclairant à la lumière de connaissances établies, organisées en référence au substrat anatomique.

Quelque soit le support utilisé (livre ou support informatique), le processus d'utilisation d'un atlas est identique et met en jeu 3 étapes principales (Figure 9) :

(1) *la mise en correspondance* entre l'anatomie du sujet étudié et l'anatomie d'un ou plusieurs sujets décrits dans l'atlas au moyen de planches ;

(2) *l'identification* de structures anatomiques chez le sujet à interpréter à partir des délimitations effectuées sur l'atlas et des étiquettes associées ;

(3) *l'accès et la navigation* dans le réseau de connaissances diverses associées aux structures anatomiques identifiées.

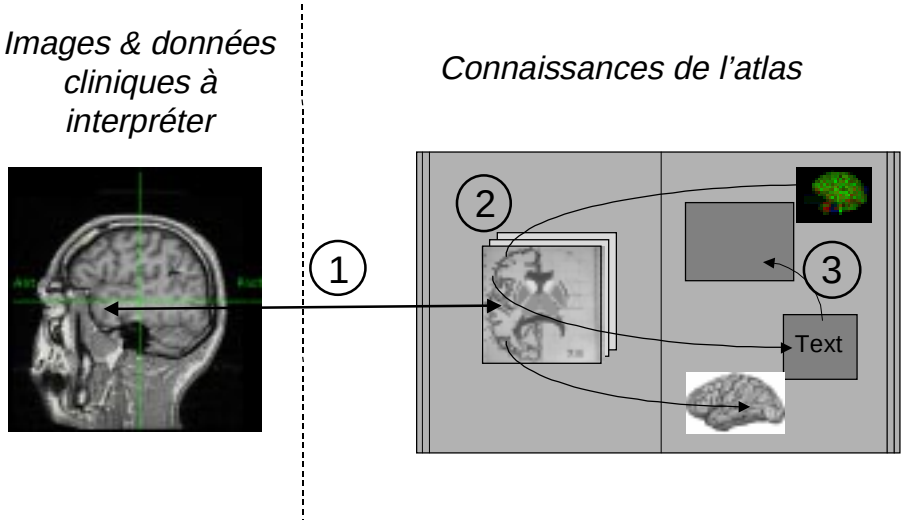


Figure 9. Processus d'utilisation d'un atlas

Les atlas sont traditionnellement édités sous forme de livres et présentent de ce fait des limitations importantes. Le passage à un support informatique permet la mise en œuvre de fonctionnalités nouvelles.

- Le premier aspect concerne le *mode de représentation* des images. L'anatomie cérébrale est tridimensionnelle donc sa compréhension suppose des allers et retours continuels entre des représentations de surface et des représentations de volume (exploration de la scène 3D sous des points de vue multiples, utilisation de plans de coupe selon les trois directions de l'espace, etc.). L'émergence d'outils de visualisation 3D et de standards comme VRML[28] (issus du domaine de la réalité virtuelle) permet la constitution et l'exploration par l'utilisateur de modèles 3D complexes des structures cérébrales.
- Le second aspect concerne la *mise en correspondance* des données relatives au cerveau étudié avec celles des cerveaux représentés dans l'atlas. Cette mise en correspondance suppose un modèle de déformation. Le support papier traditionnel n'autorise que des modèles de déformation très simples. Le plus utilisé a été le modèle du quadrillage proportionnel de Talairach (Figure 10). Les atlas électroniques permettent de transformer une opération de fusion purement mentale en la désignation explicite à l'écran des zones anatomiques qui se correspondent et facilitent donc considérablement un tel processus. Par ailleurs ils autorisent l'utilisation de modèles de mise en correspondance plus complexes que les simples interpolations linéaires par morceaux du quadrillage de Talairach (par exemple modèles élastiques). Leur efficacité

[28] VRML Virtual Reality Modeling Language

provient du fait qu'ils peuvent prendre en compte de multiples facteurs dans la mise en correspondance (axes d'inertie, principaux sillons du cortex, etc.).

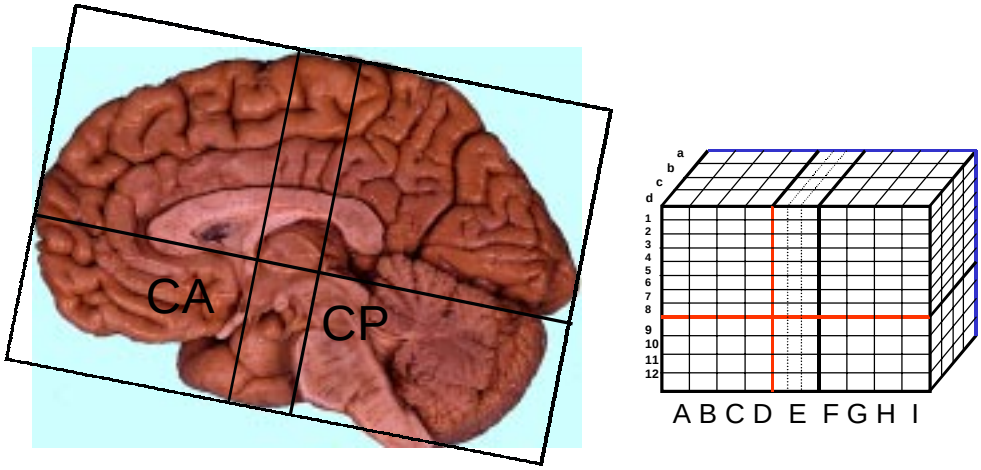


Figure 10. Le quadrillage proportionnel de Talairach :
Ce modèle est fondé sur la ligne bi-commissurale CA-CP, définie dans le plan inter-hémisphérique, et joignant la commissure antérieure (CA) et la commissure postérieure (CP) ; le quadrillage proportionnel définit une déformation linéaire par morceaux, selon les trois directions de l'espace définies par la ligne CA-CP, la verticale associée passant par CA et la direction latéro-médiale qui complète le repère

- Le troisième aspect concerne *l'extensibilité*. Contrairement au livre traditionnel, un atlas électronique est extensible, au sens où i) le nombre de cerveaux décrits dans l'atlas peut être augmenté, apportant par là même une forme de réponse au problème de la variabilité inter-individuelle ; ii) où les modèles de déformation utilisables (modèles locaux ou globaux, linéaires ou non-linéaires) peuvent être multipliés ; iii) et où enfin l'ensemble du corpus de connaissances anatomiques ou fonctionnelles accessibles peut être étendu ou actualisé.
- Enfin, le quatrième aspect concerne *la navigation* au sein de l'ensemble de connaissances que l'on associe aux planches anatomiques, et l'*utilisation possible de ces connaissances par des agents cognitifs artificiels* (composants logiciels), à des fins de résolution de problèmes. Ces deux aspects permettent d'une part un accès plus efficace à l'information pertinente dans un contexte donné, et d'autre part permettent de décharger l'utilisateur de tâches cognitives ou calculatoires que la machine peut réaliser de façon plus rapide et plus précise que l'utilisateur humain.

3.1.3. Etat de l'art

Depuis une dizaine d'années environ on assiste au développement d'atlas informatiques du cerveau qui exploitent tout ou partie des possibilités mentionnées précédemment. Trois grandes familles de travaux peuvent être distinguées.

La première s'apparie à une transposition sous forme électronique des atlas papier. Certains ont véritablement un caractère encyclopédique en rassemblant des informations issues de différentes disciplines des neurosciences. Par exemple, Toga a développé dès 1991 un atlas 3D anatomique et fonctionnel des structures anatomiques cérébrales chez le rat [Toga 1991]. D'autres travaux mettent l'accent sur l'organisation de bases de connaissances symboliques sur les structures cérébrales, par exemple [Niggemann 90] et “Brain Browser” [Bloom 90]. D'autres systèmes se focalisent sur l'intégration des données provenant de différents atlas : le système développé par Novinski [Nowinski 97] entre dans cette catégorie et gère des informations issues des atlas de Talairach et Tournoux [Talairach 88], de Schaltenbrand et Wahren [Schaltenbrand 77] et de Ono [Ono 91]. Certains systèmes ont été conçus autour d'outils de représentation 3D : c'est le cas d'un système appelé "Voxel-Man" développé par Höhne [Höhne 92a, Höhne 92b] ; il se fonde sur l'étiquetage point par point des structures anatomiques au sein d'un volume IRM 3D, et associe donc des représentations à la fois numériques et symboliques des structures cérébrales, corticales et sous-corticales. Un système très similaire a également été mis au point par l'équipe de

Kikinis à Boston pour des applications à la fois tournées vers la préparation de gestes chirurgicaux et l'enseignement [Kikinis 96]. Des développements également intéressants ont été réalisés par l'équipe de Brinkley et Rosse à l'Université de Washington à Seattle, dans le cadre du projet "Digital Anatomist" [Brinkley 93, Brinkley 99]. Les aspects terminologiques et ontologiques étudiés dans le cadre de ce projet concernent toute l'anatomie humaine et constituent les aspects les plus originaux de ces travaux [Rosse 98]. Tous ces systèmes sont de plus en plus diffusés sous la forme de CD-ROM ; des démonstrations sont parfois possibles à travers le réseau Internet.

Une seconde famille de travaux se concentre sur la conception de modèles de déformation capables de compenser la variabilité morphologique inter-individuelle. Il s'agit d'un problème central dans la conception et l'utilisation des atlas. En effet il se pose aussitôt que l'on cherche à comparer les cartes anatomiques ou les cartes fonctionnelles d'une population d'individus pour mettre en évidence des régularités, dénotant une organisation anatomo-fonctionnelle commune du cerveau. Il se pose également lorsque l'on cherche à exploiter les connaissances de l'atlas dans un contexte d'aide à la décision. Il s'agit en effet de mettre en correspondance les données anatomiques du sujet auquel on s'intéresse avec celles relatives aux cerveaux des sujets représentés dans l'atlas ou relatives à un sujet de référence, utilisé lors de la conception de l'atlas pour rassembler et synthétiser les données anatomo-fonctionnelles d'une population de sujets.

Il s'agit d'un problème algorithmique de mise en correspondance, qui met en jeu quatre aspects principaux : (1) la définition des entités anatomiques homologues sur lesquelles le processus de recalage va s'appuyer, (2) le choix d'un modèle de transformation (linéaire, ou non-linéaire de type élastique, fluide, etc.), (3) le choix d'une fonction de similarité, capable de quantifier le degré de similarité des entités homologues, et enfin (4) la méthode d'optimisation choisie. A partir des travaux pionniers de Bajcsy [Bajcsy 89] et de Bookstein [Bookstein 91] de très nombreux auteurs se sont intéressés à ce problème, parmi lesquels on peut citer : Collins [Collins 94b, Collins 95], Christensen [Christensen 95], Gee [Gee 94], Sandor [Sandor 97], Subsol [Subsol 96], Thirion [Thirion 98] et Thompson [Thompson 96]. On peut trouver un état de l'art et une discussion complète des méthodes proposées sur ce sujet dans [Barillot 99a].

Enfin, de nombreux auteurs se sont intéressés à la constitution d'atlas permettant d'aider à l'interprétation des images cérébrales. Il s'agissait principalement de constituer des bases de connaissances pour guider la reconnaissance automatique des structures anatomiques au sein d'images scanner ou IRM (par exemple [Zachmann 91, Natarajan 91, Carlsen 91, Staemmler 93, Sokolowska 86, Robinson 93]), et de définir des régions d'intérêt facilitant la quantification et l'interprétation de données fonctionnelles de type TEP, TEMP ou MEG (par exemple [Fox 85, Seitz 90, Bohm 91, Bohm 92, Lehmann 91, Evans 91]).

Enfin, il faut citer un certain nombre de travaux multi-centriques menés dans le cadre du Human Brain Project américain. Le projet présenté par Mazziota en 1993 proposait la constitution d'une base de données multi-centrique, dans le but de constituer un atlas probabiliste du cerveau [Mazziota 93, Mazziota 95]. Le système "BrainMap", développé par Fox à l'Université du Texas et accessible sur Internet avait pour but de rassembler des résultats expérimentaux obtenus dans le cadre de tâches sémantiques (protocoles expérimentaux, lieux d'activation dans l'espace de Talairach, référence des publications).

Tous ces travaux ont contribué à diversifier et enrichir le concept d'atlas, en tirant parti des possibilités nouvelles apportées par l'outil informatique : représentation en 3D des structures anatomiques, fusion de données inter-sujet, constitution de bases de données, intégration au sein de systèmes intelligents d'aide à la décision. On note cependant que la définition de ces modèles et de ces connaissances est restée la plupart du temps focalisée par rapport à un problème donné (interprétation d'images anatomiques, quantification de données fonctionnelles, enseignement de l'anatomie), sans que les aspects d'inter-disciplinarité, ni de ré-utilisation dans des contextes différents, pourtant souvent soulignés comme importants dans la littérature [Mazziota 95], ne soient mis en œuvre.

3.2. Contributions au domaine

Notre intérêt pour ce concept d'atlas informatique se situe principalement dans le contexte de l'aide à la préparation de gestes chirurgicaux en neurochirurgie. Historiquement notre démarche est partie d'une problématique de représentation 3D des structures anatomiques cérébrales. Nous nous sommes ensuite intéressés aux problèmes de fusion multi-patient puis à la gestion de connaissances à proprement parler, à savoir la représentation explicite du contenu des images et la gestion d'un accès contextuel aux informations. Enfin nous avons tenté d'unifier l'ensemble des fonctions d'un atlas en un concept commun cohérent. C'est cet itinéraire que nous retraçons dans cette section.

3.2.1. Travaux pionniers en représentation 3D des structures anatomiques

Le début des années 80 a vu le développement rapide de l'imagerie médicale numérique (scanner X, IRM et radiologie numérique). Cette évolution vers le numérique rendait possible la prise en compte de la nature tridimensionnelle des images, et l'exploitation conjointe d'images de modalités différentes (concepts d'imagerie et d'applications multimodalité). Jean-Marie Scarabin a été conscient dès 1980 des applications très importantes de ces concepts dans le domaine du planning chirurgical notamment en neurochirurgie. Il s'agit d'utiliser l'image numérique pour mieux identifier la cible à atteindre lors du geste chirurgical, mieux appréhender son environnement, notamment vasculaire à l'aide de l'angiographie, et en déduire la voie d'abord la plus appropriée. Tout un ensemble de travaux exploratoires ont été menés à partir de 1981 sur les thèmes de la représentation 3D des structures anatomiques et de la confrontation des informations issues de modalités différentes. Ces travaux, menés par Christian Barillot et moi-même, étaient à l'époque extrêmement originaux. Ils ont pu être menés grâce au support du CCETT[29], qui nous a accueillis jusqu'en 1988 en nous offrant une infrastructure matérielle et logicielle particulièrement favorable, ainsi qu'un encadrement scientifique et technique.

3.2.1.1. Représentation 3D du réseau vasculaire cérébral (1984-1985)

Ces travaux réalisés avec Christian Barillot avaient pour but de créer des représentations 3D du réseau vasculaire cérébral. La numérisation des coordonnées 3D des vaisseaux était réalisée à partir de couples stéréoscopiques d'angiographies cérébrales, grâce à un stéréorestituteur analytique (Traster, Matra). Ce système avait été mis en place dans le cadre de mon doctorat d'ingénieur pour mettre en correspondance des données scanner (contours externes de la tête et contours d'une lésion), des couples stéréoscopiques d'angiographies obtenues en conditions stéréotaxiques, et d'autres documents radiologiques également obtenus en conditions stéréotaxiques. Le système proposé avait pour but de définir dans l'espace du cadre de stéréotaxie le point cible à atteindre dans l'espace cérébral ainsi que la trajectoire d'accès à cette cible, en évitant les vaisseaux environnants (Figure 11) [Gibaud 82, Gibaud 83].

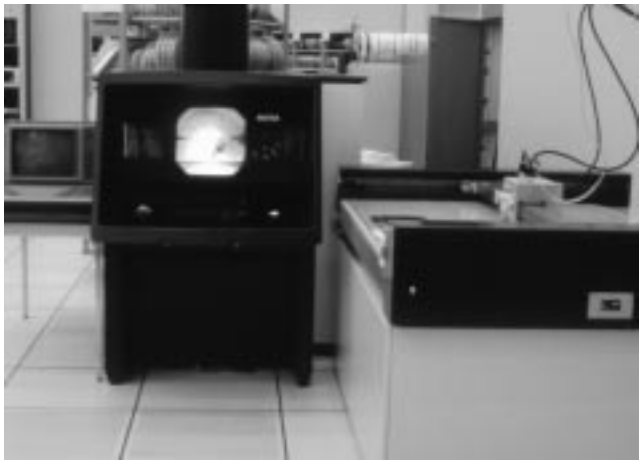


Figure 11. Stéréorestituteur analytique

Ce système bien que très original dans sa conception n'a pas eu d'utilisation clinique, notamment à cause de la complexité de la récupération des informations scanner. En revanche il a été utilisé pour créer des modèles 3D de l'arbre vasculaire cérébral. La saisie concernait la position de points échantillonnés le long de l'axe des vaisseaux, ainsi que le calibre des vaisseaux. L'application de saisie était organisée de façon à exploiter au mieux la structure arborescente du réseau vasculaire artériel ou veineux. Ces informations 3D étaient ensuite utilisées pour modéliser la surface des vaisseaux à l'aide de tronçons de cylindres composés de facettes triangulaires (Figure 12) [Gibaud 84, Barillot 84, Barillot 85a, Barillot 85b]. La scène 3D obtenue pouvait ensuite être visualisée par synthèse d'images pour produire des images ou des animations. Ce travail, très original à l'époque, nous a valu à Christian Barillot et moi-même un prix au Forum des jeunes chercheurs de Lille en 1984.

---

[29] Centre Commun d'études de Télédiffusion et de Télécommunications, Cesson-Sévigné

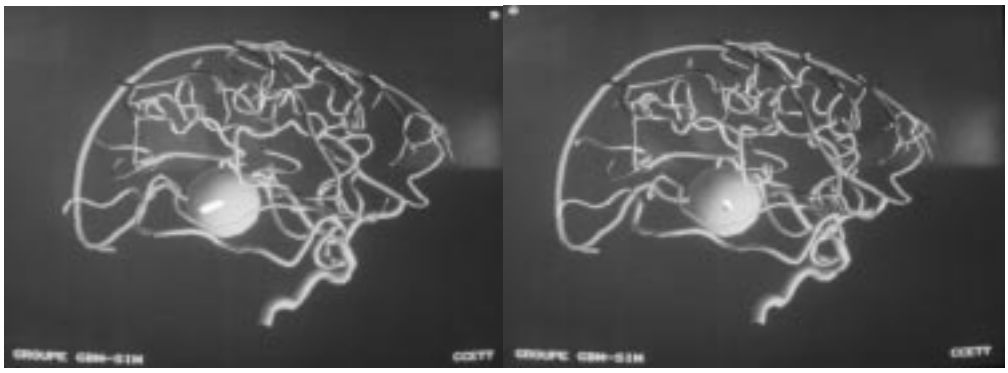


Figure 12. Couple stéréoscopique généré à partir d'un modèle 3D du réseau vasculaire cérébral (simulation de la ponction d'un kyste)

3.2.1.2 Représentation 3D des structures anatomiques cérébrales (1987)

Ces travaux avaient pour but de réaliser des modèles 3D des structures anatomiques cérébrales. Le contexte de lancement de ce projet, initié par Jean Talairach et Jean-Marie Scarabin était la mise en place d'une exposition sur le cerveau au Musée de La Villette : il s'agissait de réaliser une animation 3D en synthèse d'images, à visée didactique, montrant des structures cérébrales profondes comme les ventricules cérébraux, le thalamus, le noyau lenticulaire, le corps calleux, etc. Au delà de cette réalisation, il s'agissait pour nous de réaliser un premier atlas numérique 3D des structures anatomiques cérébrales. Sur le plan des méthodes, nous avons réalisé (toujours à l'aide du stéréorestituteur et de sa table de pointage) un outil de numérisation des contours de ces structures, dessinées sur calque par Jean Talairach et Pierre Tournoux. Des modèles polygonaux des surfaces ont ensuite été générés par triangulation de ces contours à l'aide d'un algorithme original développé par Christian Barillot (Figure 13) [Barillot 87, Barillot 88].

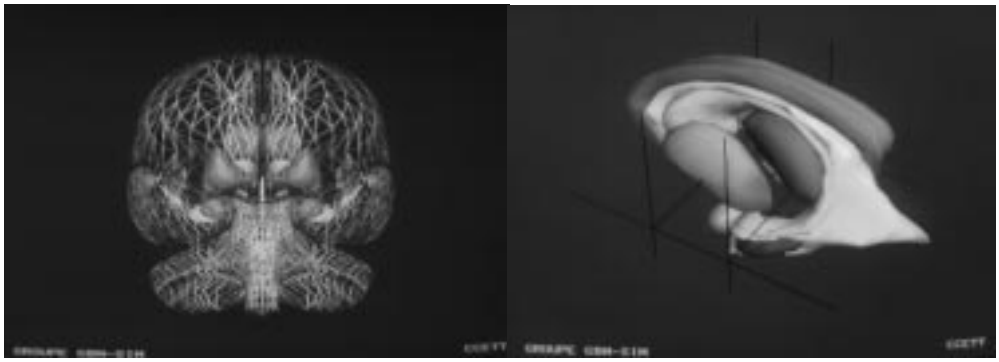


Figure 13. Modèles 3D des structures anatomiques cérébrales
L'image de droite est une vue latérale droite des structures de l'hémisphère droit : on reconnaît le corps calleux (en violet), le ventricule latéral (en blanc), le noyau caudé (en jaune), le noyau lenticulaire (en vert), le thalamus (en rouge) et le noyau amygdalien (en orange) ; les lignes noires figurent la ligne bi-commissurale CA-CP et les verticales associées. L'image de gauche montre en vue de face les structures des deux hémisphères (travail réalisé d'après des plans dessinés par Jean Talairach et Pierre Tournoux)

3.2.2. Fusion multimodalité et accès à des atlas

L'objectif poursuivi était de mettre en place une plate-forme logicielle permettant le recalage et la confrontation de données multimodalité recueillies chez un patient, ainsi que la mise en correspondance de ces données avec celles d'un atlas anatomique, pour des applications aussi bien cliniques (par exemple pour la préparation d'une intervention), que de recherche (étude de la variabilité de certaines structures anatomiques, ou des relations qui existent, par exemple, entre les gyri du cortex cérébral et les vaisseaux).

L'approche choisie était intrinsèquement 3D, même si les images étaient visualisées en 2D, sous forme de coupes (pour le scanner, l'IRM ou l'atlas), ou de projections (angiographies de face et de profil). La mise en correspondance s'appuyait sur des repères anatomiques (référence CA-CP), visibles sur les images IRM et sur

l'identification du quadrillage proportionnel de Talairach. Le recalage entre les différentes modalités se faisait par le biais de structures visibles sur les couples de modalités à recaler, par exemple voûte crânienne entre une coupe IRM inter-hémisphérique et une série de coupes scanner, ou bien genou du corps calleux et artère péri-calleuse entre une coupe IRM inter-hémisphérique et une artériographie de profil. Pour les besoins de ce projet les planches de l'atlas de Talairach [Talairach 88] ont été numérisées (incidences axiales, sagittales et vertico-frontales), soit environ une centaine de planches en format 752 x 512.

Un travail de validation a été réalisé, visant à évaluer la précision et la reproductibilité des opérations de recalage [Barillot 90, Lemoine 91a, Lemoine 91b, Barillot 93]. Ce travail avait pour but d'identifier les différentes causes d'erreur (processus d'acquisition des images, subjectivité de l'opérateur, reproductibilité des opérations), d'évaluer leurs importances respectives.

3.2.3. Intégration de connaissances symboliques et problématique de navigation (1991-1996)

3.2.3.1. Contexte

A partir de 1991, nous avons initié une nouvelle activité de recherche centrée sur la gestion de connaissances sur l'anatomie et le fonctionnement du cerveau. Ceci résultait de différents facteurs :

(1) Notre propre expérience dans le domaine de l'imagerie multimodalité et de l'utilisation des atlas mettait en évidence la nécessité de ne pas s'arrêter à une représentation uniquement numérique des structures anatomiques cérébrales (planches d'atlas), mais de pouvoir associer à ces planches tout un ensemble de connaissances symboliques ;

(2) Parallèlement, cette période était marquée par le développement dans le Service de Neurochirurgie d'une activité importante dans le domaine de la chirurgie de l'épilepsie, domaine pour lequel des travaux intéressants avaient été menés en intelligence artificielle, notamment par Pridi Siregar au sein de l'équipe de Jean-Louis Coatrieux ;

(3) Enfin, cette période était marquée par l'arrivée à Rennes de Patrick Chauvel et de son équipe, porteurs de projets de recherche dans les domaines de l'épilepsie et de la physiologie du cortex cérébral.

L'idée maîtresse de l'approche proposée consistait à gérer dans un système intégré des connaissances existant sous des formes variées : connaissances *symboliques* (par exemple objets représentés sous forme de *frames*), *illustrations* (textes ou images illustrant pour un utilisateur humain la signification d'un concept), *images* ou *signaux* recueillis chez un patient, *modèles numériques* (par exemple cartes des probabilités de présence d'une structure anatomique donnée).

L'intérêt d'un tel système nous paraissait multiple :

(1) réunir des connaissances susceptibles d'aider à résoudre différents types de problèmes (par exemple la reconnaissance et l'étiquetage d'images anatomiques, localisation des régions cérébrales mises en jeu au cours d'une crise d'épilepsie) ;

(2) mieux formaliser les connaissances, c'est-à-dire les rendre exploitables à la fois par des utilisateurs humains mais également par des agents cognitifs artificiels (composants logiciels) ;

(3) constituer une base de cas, incluant des images multimodalité (anatomiques et fonctionnelles) recueillies chez des sujets, ainsi que des descriptions symboliques des structures anatomiques mises en évidence sur ces images.

Même s'il nous a paru souhaitable de garder une certaine généralité (au regard des applications), nous avons ancré notre réflexion sur des exemples concrets puisés dans deux domaines principaux : l'aide à l'étiquetage des structures corticales (gyri et vaisseaux) dans des images IRM et angiographiques ; et l'étude des corrélations morphologiques et fonctionnelles dans la chirurgie de l'épilepsie.

3.2.3.2. Approche méthodologique

L'approche choisie revêtait plusieurs aspects :

1. Contrairement à la tendance naturelle qui tend à ce que les connaissances à représenter soient définies de manière *ad-hoc* au regard d'un problème posé, nous avons tenté d'organiser données et connaissances de façon non spécifique (c'est-à-dire non dépendante d'un problème particulier), avec le souci de faciliter leur partage et leur réutilisation dans des contextes différents.

2. Nous avons considéré que les données relatives à des sujets (décrivant des instances de cerveaux) constituaient une forme de connaissance à part entière, et devaient donc être considérées et gérées en tant que tel.

3. Nous avons choisi d'organiser les connaissances selon différentes perspectives, correspondant schématiquement aux différents domaines de spécialité rencontrés (par exemple, aspects fondamentaux du fonctionnement des neurones, aspect neurochimique, cytoarchitectonique, anatomie macroscopique, cartographie fonctionnelle, neurophysiologie, etc.). Cette approche facilite l'acquisition et la compréhension des connaissances, ainsi que leur réutilisation [David 93, Simmons 93].

4. Enfin, nous avons fait le choix d'un mode d'accès aux informations spécialisé en fonction du type d'utilisateur et du type de tâche à effectuer. Cela nécessite une représentation explicite de la tâche à effectuer, de façon à permettre l'évaluation de la pertinence des informations au regard de ce contexte.

Au niveau de l'organisation du système, l'architecture proposée incluait trois composants : (1) une *base de connaissances*, exprimant une description symbolique des objets qui composent le cerveau, (2) une *base d'informations sujets*, permettant de représenter des données relatives à des exemplaires de cerveaux, et (3) un *hypermédia* gérant de façon intégrée l'accès aux informations (Figure 14).

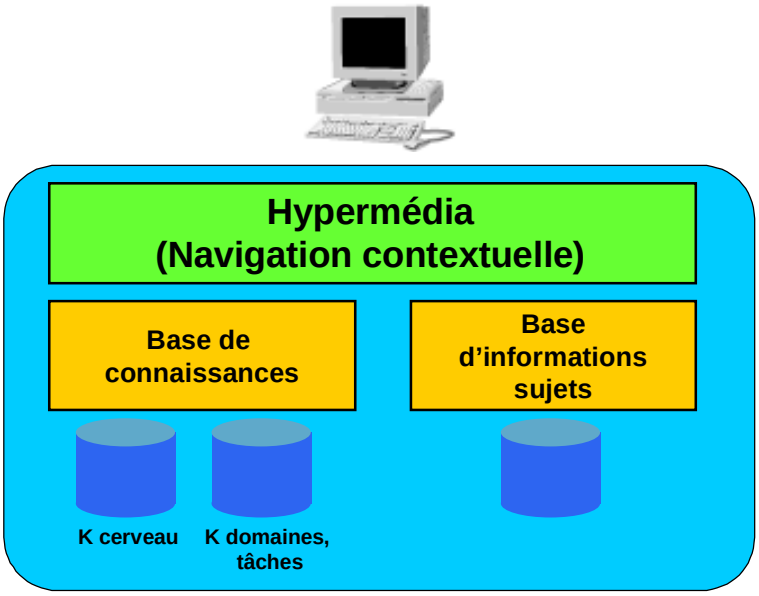


Figure 14. Architecture d'un système de gestion de connaissances anatomiques cérébrales

3.2.3.3. Résultats: organisation d'une base de connaissances et d'un système de navigation hypermédia

(Thèse de E. Montabord en collaboration avec le LIASC[30], ENST de Bretagne [Montabord 1996])

La base de connaissances permettait la représentation explicite des concepts du domaine sous une forme symbolique. Elle se composait de deux parties. La première rassemblait des *connaissances contextuelles*, utilisées pour le contrôle de la navigation : elle décrivent les domaines (domaines de spécialité des utilisateurs et relations avec les concepts du domaine), et les tâches (représentées sous forme d'une hiérarchie objectifs / sous-objectifs / actions). La seconde décrivait les *éléments du cerveau*, par exemple les structures anatomiques

[30] LIASC : Laboratoire Intelligence Artificielle et Systèmes Cognitifs, ENST Bretagne, Brest

(comme les gyri ou les sillons du cortex), mais également les éléments intervenant dans le fonctionnement des neurones (comme les neurotransmetteurs), ou les systèmes fonctionnels.

La base de connaissances était fondée sur le paradigme de représentation objets, selon lequel les connaissances sont représentées sous forme d'objets et de relations entre ces objets [Masini 89]. Un objet se définit par un ensemble de propriétés (couples attribut-valeur) attachées à cet objet, ou accessibles par un mécanisme d'héritage ou de partage d'attributs. L'analyse des concepts que nous avons faite a montré qu'un modèle classe/instance n'était pas pleinement satisfaisant. En effet, il n'est pas toujours possible de définir un objet par un ensemble de propriétés nécessaires et suffisantes : un modèle basé sur les *prototypes*, inspiré des travaux de Rosch en psychologie cognitive [Rosch 75] nous a paru mieux adapté : en effet, dans ce type de modèle le prototype est l'exemplaire représentatif de la classe sans que qu'il soit nécessaire que les individus partagent entre eux ni avec le prototype un ensemble de propriétés communes. Ceci nous a paru mieux à même de rendre compte de la variabilité inter-individuelle, problème auquel on est confronté aussitôt que l'on rentre en détail dans la modélisation des structures anatomiques cérébrales - notamment corticales et vasculaires, qui sont les structures auxquelles nous nous sommes d'abord intéressés.

Face au problème des différents domaines de spécialité concernés par le cerveau, nous avons choisi d'organiser les connaissances sous la forme de plusieurs hiérarchies d'objets indépendantes (construites sur la relation de généralisation/spécialisation), à raison d'une par domaine de spécialité. Cette approche est inspirée de l'architecture du système TROPES [Marino 91]. Chaque hiérarchie comprend une hiérarchie d'éléments et une hiérarchie de caractéristiques. Cette solution permet de rendre indépendants les différents domaines, ce qui donne la flexibilité souhaitée pour la définition des propriétés à l'intérieur de chaque domaine. Une relation a été introduite pour établir des "ponts" entre ces différentes hiérarchies. Il s'agit de la relation d'égalité extensionnelle, qui permet de représenter le fait que les objets réels ont même extension à travers les différents domaines.

En ce qui concerne la navigation (parcours de la base d'informations par l'utilisateur), nous avons proposé un système de navigation, qui gère l'accès à l'ensemble des informations du système, quelle que soit la forme de ces informations (description symbolique d'un objet de la base de connaissances, graphe des objets reliés par une certaine relation, illustrations associées à un objet, instances de la base de données associées à un concept). Il est basé sur une notion d'*hypermédia*, qui permet de naviguer librement entre des îlots d'information (présentés dans des unités d'informations). Le système utilisait une approche contextuelle, visant à sélectionner les éléments d'informations pertinents au regard de la tâche en cours et du profil de l'utilisateur. Ces mécanismes s'appuyait sur une modélisation explicite des tâches inspirée des travaux de Jutta Willamovski [Willamovski 94], eux mêmes inspirés des travaux de Chandrasekaran sur les tâches génériques [Chandrasekaran 93] et des modèles de tâches utilisés dans KADS [Wielinga 92, Schreiber 94]. L'originalité du mode de navigation proposé était que les liens eux-mêmes étaient dynamiques et construits au décours de la navigation en utilisant les informations contextuelles (domaines de l'utilisateur et objectifs). Cette fonction était réalisée grâce à des opérations de *filtrage* de l'information accessible, utilisant une notion de *point de vue*, mis à jour au fur et à mesure de la navigation, mais associé à l'unité d'information présentée à l'utilisateur. Ainsi, dans le cas où plusieurs unités d'informations sont présentes à l'écran, la navigation peut reprendre dans l'état où elle avait été interrompue.

Ces mécanismes ont été expérimentés au moyen d'une maquette, réalisée à partir de 1993 [Montabord 93, Barillot 94, Kanellos 94, Montabord 95, Garlatti 95, Garlatti 96]. Elle s'appuyait sur un outil de représentation de connaissances appelé Y3[31] [Ducournau 90]. Il s'agit d'un langage orienté objet de type hybride (c'est à la fois un langage de classes et un langage de frames), écrit au dessus de LISP (Le_Lisp, Ilog). Cette maquette a montré la faisabilité de l'approche proposée, au moins pour l'accès à des connaissances générales sur le cerveau, que celles-ci soient de nature symbolique, textuelle ou image (planches d'atlas). En revanche les aspects d'accès et de navigation au sein d'une base de données (données relatives à des sujets) n'ont pas pu être abordés ; en effet, ce type d'accès pose des problèmes spécifiques compte tenu du nombre potentiellement important de modes d'accès possibles pour sélectionner des entités aussi complexes que les structures anatomiques cérébrales, que l'on peut souhaiter caractériser de multiples façons (caractéristiques morphologiques, rôle fonctionnel, âge, sexe, latéralité du sujet, etc.).

Ces travaux menés en collaboration avec Serge Garlatti du LIASC entre 1990 et 1996 étaient, avec le recul, extrêmement riches et novateurs. Ils n'ont malheureusement pas donné lieu à des applications tangibles dans le domaine de la préparation de gestes chirurgicaux, domaine qui constituait pourtant notre principale source d'inspiration et d'applications potentielles. Les raisons en sont multiples. La principale est à mon avis que notre

[31] Y3 : Yafool-Yafen-Yaflog, SEMA Group

recherche sur ces systèmes d'aide à la décision était "passablement décalée" par rapport aux possibilités des outils de traitement d'images ou de fusion de données disponibles alors au sein du laboratoire. Il n'en demeure pas moins que nous avons acquis pendant ces années une sensibilité particulière, héritée du monde des sciences cognitives, et pertinente vis à vis des problèmes de modélisation conceptuelle, et de compréhension du rôle de l'utilisateur dans la coopération homme-système. Je suis pour ma part convaincu que cette sensibilité sera fondamentale pour aborder sainement dans le futur des problèmes aussi difficiles que celui de la fédération de bases d'informations hétérogènes en imagerie cérébrale, évoqués plus loin dans la section consacrée à la prospective.

3.2.4. Base d'informations sujets et problème d'évolution de schéma

(Thèse de J.H. Yapi - collaboration avec le Département d'Informatique, ENST de Bretagne [Yapi 96a])

3.2.4.1. Contexte

La connaissance relative à des exemplaires de cerveaux, issue de l'analyse d'images cérébrales, peut être exprimée à des niveaux de formalisation variés, décrivant sous forme plus ou moins explicite le contenu des images. En effet, dans des images brutes, cette connaissance est totalement implicite, c'est-à-dire entièrement à la charge de l'utilisateur, qui interprète lui-même les images à chaque lecture pour en extraire les informations qui l'intéressent, dans un contexte donné. La délimitation de régions d'intérêt et l'étiquetage des structures anatomiques dans les images (qui consiste à leur donner un nom renvoyant vers un modèle prototypique de ces structures, lui-même implicite ou explicite), ainsi que l'élaboration de descriptions complexes de ces structures anatomiques, de leurs propriétés spécifiques ou de leurs relations constituent des niveaux de formalisation plus élaborés de ce contenu, sur lequel il est possible de s'appuyer pour organiser l'accès à ces images.

L'un des avantages déjà souligné de systèmes informatisés de gestion de connaissances est la capacité à étendre le système ; en particulier il apparaît intéressant de chercher à *thésauriser* la connaissance relative à des exemplaires de cerveaux au sein d'une base de cas (appelée *base d'informations sujets* dans la suite) pour pouvoir s'y référer (raisonnement à base de cas) ou pour en faire émerger des régularités, qui constitueraient une fois validées une forme de connaissance à part entière. L'utilisation de SGBD peut être d'une aide précieuse dans l'implémentation de telles bases d'informations.

L'un des principaux problèmes inhérents à la mise en place de telles bases d'informations est lié à l'évolutivité du système. En effet, stocker des données dans une base de données suppose de définir au préalable le schéma conceptuel et les types des informations à stocker. Au fur et à mesure du déploiement du système et notamment pour faire face à de nouveaux besoins il peut s'avérer nécessaire de décrire de nouveaux objets, ou de modifier des objets existants. Au niveau d'une implantation à l'aide d'un système de gestion de base de données (SGBD) ce problème est celui de *l'évolution de schéma* [Bertino 91]. Ce problème est particulièrement aigu pour le type d'applications qui nous intéresse, pour deux raisons principales. D'abord, ce type de base de données ne peut être conçu (en terme de définition du schéma) que de façon progressive. En effet au fil des besoins, on peut être amené à décrire au sein des images des entités auxquelles on ne s'était pas intéressé de prime abord. Pour ce faire on est amené à modifier les objets du schéma et à en définir de nouveaux. Par ailleurs, la description, la délimitation au sein des images et l'étiquetage des structures anatomiques représentent un travail et une plus-value importante apportée à ces images. Il est donc important que cette information puisse être préservée lors des opérations d'évolution de schéma, ce que ne permettent généralement pas les SGBD usuels. C'est le problème que nous avons étudié, notamment vis à vis d'opérations potentiellement complexes comme la fusion, l'éclatement ou la suppression de classes.

3.2.4.2. Approche méthodologique

Nous avons choisi d'étudier ce problème dans le contexte de l'utilisation de bases de données orientées objet (SGBDOO), mieux adaptées que les SGBD relationnels à la gestion d'objets complexes tels que ceux utilisés pour représenter des entités comme des structures anatomiques du cerveau ou des activités cérébrales explorées par des méthodes d'imagerie fonctionnelle.

Nous nous sommes orientés vers des mécanismes procédant à une modification effective des classes d'objets et des instances d'objets existantes, plutôt que vers ceux supportant des versions parallèles des classes ou gérant un historique de ces versions. En effet les types d'évolution auxquels nous sommes confrontés ne nécessitent pas la conservation des versions antérieures des objets. L'étude a porté sur la cohérence structurelle du schéma et sur la cohérence des données ; en effet la conservation (et donc l'adaptation ou la migration) des instances existantes

est comme on l'a dit précédemment une contrainte majeure dans notre application. La cohérence comportementale des objets n'a pas été étudiée car elle suppose d'analyser le corps de méthodes associées aux objets et, en cas d'incohérence, suppose l'intervention du programmeur.

3.2.4.3. Résultats

Le travail réalisé a consisté à définir un mécanisme d'évolution de schéma, sous la forme d'opérations modifiant la structure des classes d'un schéma. La définition de la sémantique précise des opérations s'est appuyée sur l'analyse approfondie des possibilités et des limitations des mécanismes proposés au sein des SGBD à objets décrits dans la littérature, principalement les systèmes ORION [Banerjee 87], GemStone [Penney 87], Encore [Skarra 86] et O2 [Zicari 91]. Le mécanisme que nous avons proposé inclut les opérations classiques d'ajout et de suppression d'attributs, d'ajout de classe ou de super-classe, et permet la suppression de classes, la fusion de classes et l'éclatement de classes [Yapi 96b, Yapi 96c]. Une des principales contributions se situe dans la définition de la sémantique de ces opérations : il s'agissait de trouver le « bon niveau », de complexité limitée et pourtant suffisamment macroscopique et intuitif pour l'utilisateur - car toute opération pourrait être décomposable en opérations élémentaires enchaînées par l'utilisateur lui-même.

Sans rentrer ici dans les détails des problèmes posés par chacune de ces opérations, il faut souligner certaines originalités du mécanisme proposé. Les choix qui ont été faits vont toujours dans le sens de la préservation des informations existantes (quitte à ce que l'utilisateur invoque par la suite des opérations de suppression de propriétés ou de liens d'héritage, s'il le souhaite). Par exemple, lors de la suppression d'une classe, les sous-classes et instances de cette classe peuvent être rattachées à toutes les super-classes de la classe à détruire. De même, lors des opérations de fusion de classes, on s'efforce de rattacher la classe résultante aux super-classes des classes fusionnées, de manière à préserver l'héritage des propriétés associées à ces super-classes et donc les valeurs des attributs au niveau des instances existantes. Ceci nécessite bien entendu un traitement relativement complexe, de façon à garantir la compatibilité des types et à ne pas introduire de cycle dans le schéma. Pour une généralité suffisante ces différentes opérations ont été étudiées dans un contexte d'héritage multiple.

Une maquette implémentant ces mécanismes a été réalisée, de façon à démontrer la faisabilité de l'approche proposée. Elle utilisait le SGBD orienté objet O2 (O2 Technology). Un mécanisme d'adaptation des instances a été réalisé qui permet de rattacher des instances existantes à une nouvelle classe (migration), de supprimer les attributs qui n'existent plus (restructuration) et de modifier les références à d'autres instances. Compte tenu des contraintes liées à la génération des identificateurs d'objets dans le système O2, une solution fondée sur un « représentant d'instance » a été retenue. Elle permet de réaliser, par la seule modification du représentant d'instance, la mise à jour de toutes les références à cette instance. L'inconvénient de cette solution est que ce représentant d'instance constitue une indirection qui pénalise donc l'ensemble des accès aux objets et concerne tous les programmes des utilisateurs.

Ce travail nous a conforté quant à la faisabilité d'une approche évolutive de la construction d'une base de cas (Base d'Informations Sujets). En particulier, il est possible de préserver les instances des objets existants, au travers d'opérations de restructuration ou de migration. Le principal obstacle au déploiement de ces fonctionnalités découle du mode d'implémentation choisi : en effet, la solution la plus satisfaisante consisterait certainement à implémenter ces mécanismes *à l'intérieur même* du SGBD, plutôt qu'au-dessus du SGBD (comme nous avons été contraint de le faire). En effet cela simplifierait de façon considérable la mise à jour et l'accès aux instances. En revanche ceci ne peut être réalisé que par le concepteur du SGBD. La mise en œuvre de ces solutions au-dessus du SGBD est toujours possible mais nécessite de développer et de maintenir une couche logicielle spécifique qui contrôle toutes les opérations d'accès à la base de données et à son schéma.

L'expérience acquise au cours de ce projet concerne principalement la compréhension des problèmes mis en jeu lors des opérations de réorganisation d'une hiérarchie d'héritage d'objets (généralisation/spécialisation). Cette expérience sera certainement mise à profit pour l'étude d'agents de médiation capables d'assurer une interopérabilité sémantique entre des bases d'informations hétérogènes en imagerie cérébrale (voir plus loin, section consacrée à la prospective).

3.2.5. Démarche générale de gestion des connaissances

Ces travaux, ainsi que l'analyse des tendances de la littérature nous ont amenés à repenser le concept d'atlas, tant au niveau de son contenu, de sa constitution et de son utilisation. Notre approche originale de ce problème met l'accent sur l'aspect potentiellement *évolutif* d'un atlas informatisé, tant au niveau de sa *construction* (et donc de son contenu), que de son *utilisation* [Gibaud 98]. Cette dimension d'évolutivité est représentée Figure 15.

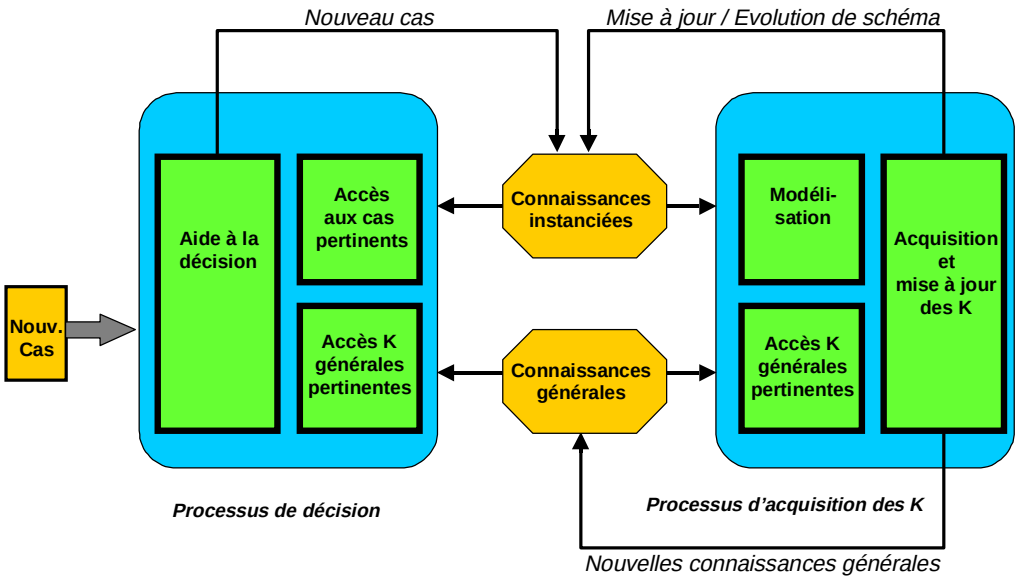


Figure 15. Processus de production et d'utilisation des connaissances au sein d'un atlas dans un cadre d'aide à la décision

Cette figure décrit d'une part des processus d'utilisation des connaissances dans un cadre d'aide à la décision (partie gauche de la figure), et d'autre part des processus de production de nouvelles connaissances à partir des données recueillies dans ce même cadre (partie droite). Elle fait apparaître deux types de connaissances fondamentalement différents :

(1) des connaissances *générales* sur le cerveau (canonical knowledge pour reprendre la terminologie de Rosse [Rosse 98]), c'est à dire communes à l'ensemble des individus, ou à des sous-populations significatives (fondées par exemple sur l'âge, la dominance manuelle, le sexe, etc.) ;

(2) des connaissances *instanciées* (instanciated knowledge [Rosse 98]), c'est-à-dire relatives à des *exemplaires particuliers* de cerveaux, issues d'un processus d'analyse ayant permis d'expliciter leurs caractéristiques propres, qu'elles soient morphologiques, structurelles ou fonctionnelles.

Des travaux en psychologie cognitive comme ceux de Schmidt ont clairement montré comment ces différents types de connaissances contribuent à la construction de l'expertise en médecine [Schmidt 93].

<u>*Connaissances générales*</u>

Nous distinguons quatre types principaux de connaissances générales (ou prototypiques) :

- des *objets symboliques* : il s'agit de descriptions ontologiques des objets qui concernent le cerveau, qu'il s'agisse par exemple de composants anatomiques, de systèmes fonctionnels, ou de relations entre ces entités comme des relations de voisinage dans l'espace, de connexion (afférence ou efférence), de relations partie-tout. Ces objets et leurs attributs ainsi que les relations qui les lient expriment des propriétés générales qui s'appliquent, en principe, à l'ensemble des cerveaux ; c'est dans ce sens qu'on les qualifie de prototypiques ; néanmoins elles ne s'appliquent pas nécessairement à l'ensemble des individus (du fait de la variabilité inter-individuelle). Ces objets symboliques sont généralement exprimés à l'aide de modèles orientés objet.
- des *illustrations* : on entend par illustrations des ensembles d'informations (par exemple textes, images, schémas) que l'on peut associer à des objets symboliques pour éclairer la signification qu'on veut leur donner. Par définition, les illustrations s'adressent à des utilisateurs humains, et non à des agents artificiels.
- des *modèles de décision* (ou savoir-faire) : on met dans cette catégorie tout ce qui explicite les étapes d'un raisonnement, ou d'un traitement visant à créer une information à partir d'une autre, comme par exemple un modèle de déformation permettant de mettre en correspondance le cerveau d'un sujet avec celui d'un autre sujet, ou un algorithme définissant les opérations à exécuter pour segmenter une structure anatomique dans une image 3D.

- des *données numériques fonctions de l'espace ou du temps* : par exemple des cartes de probabilité d'appartenance à une structure anatomique cérébrale donnée, ou des masques binaires 2D ou 3D délimitant une région particulière au sein de ces images.

Connaissances instanciées

Les connaissances instanciées décrivent des propriétés propres à un cerveau particulier, caractérisant son anatomie, sa physiologie, le comportement de l'individu ou l'individu lui-même (par exemple sexe, latéralité, âge, pathologies éventuelles). Elles peuvent selon les cas être recueillies *in vivo* (par exemple imagerie scanner X, IRM, TEP, ou exploration fonctionnelle EEG, SEEG, MEG), ou à partir de pièces anatomiques (données histologiques ou histochimiques). Elles peuvent concerner des structures cérébrales à l'échelle macroscopique (cerveau complet, structures corticales ou sous-corticales, cavités ventriculaires) ou microscopique (e.g. organisation en couches du cortex).

Ces informations se présentent sous des formes variées. Il peut s'agir :

- de *données numériques fonctions de l'espace ou du temps* : images ou signaux physiologiques recueillis sur le cerveau en question ;
- *de données symboliques* dont les attributs et les relations contribuent à décrire les caractères spécifiques du cerveau étudié : par exemple longueur et profondeur d'un sillon, volume de la substance grise d'un gyrus, relations de voisinage avec les gyri et sillons environnants, etc. Généralement ces données symboliques *explicitent* des propriétés mises en évidence sur des images ou des signaux, que celles-ci aient été créées de façon supervisée (c'est-à-dire par un utilisateur humain) ou non-supervisée (agent cognitif artificiel). Ce terme de données symboliques recouvre également la description des conditions dans lesquelles les images ont été recueillies (informations souvent appelées méta-données) comme par exemple la technique d'imagerie utilisée, le protocole d'activation dans le cas des techniques d'imagerie fonctionnelle, etc.

Toutes ces données symboliques constituent autant d'éléments d'indexation qui peuvent permettre de définir des chemins d'accès vers les images ou et d'évaluer leur pertinence vis à vis d'un contexte donné (recherche de cas similaires pour des applications d'aide à la décision).

Complémentarité entre connaissances générales et connaissances instanciées

Connaissances générales et connaissances instanciées sont complémentaires. En effet les descriptions que l'on peut faire d'exemplaires de sujets particuliers font toujours référence à un système de concepts, qu'il est utile de formaliser en une ontologie du domaine. Par exemple labéliser un sillon particulier en le reliant au terme "Sillon Central" renvoie vers une signification et des propriétés prototypiques de ce concept. De même expliciter la signification et les propriétés d'une relation spatiale comme "situé en avant de" (par exemple cette propriété est-elle transitive ?) élargit notablement le cadre d'utilisation des connaissances représentées dans le système en particulier vis à vis d'une utilisation par des agents artificiels. Ceci dit, cette démarche ne prétend nullement résoudre les problèmes de terminologie, qui sont inhérents aux différentes vues possibles sur ces objets, non nécessairement cohérentes. Elle a toutefois le mérite de mettre en lumière d'éventuels conflits sémantiques et donc de permettre la ré-utilisation des informations moyennant d'éventuelles adaptations.

Inversement, l'accès à des exemplaires de cerveau qui *instancient* des propriétés prototypiques apportent une information précieuse : par exemple, un agent artificiel chargé de segmenter une certaine région anatomique pourra utiliser à la fois des connaissances symboliques prototypiques (par exemple relations de voisinage avec des structures anatomiques faciles à reconnaître) mais également à des données spécifiques à un individu (résultat de la segmentation de la même structure chez un autre sujet).

Processus d'utilisation des connaissances pour l'aide à la décision

Le traitement et l'analyse des informations recueillies chez un sujet (par exemple examen IRM 3D, explorations neurophysiologiques) amènent le clinicien à se poser tout un ensemble de questions, du type : la lésion se situe-t-elle à proximité immédiate du cortex moteur ? l'activation en MEG d'une certaine région du cortex lors d'une tâche de production de langage est-elle plausible ? La résolution de ces problèmes peut amener le clinicien à s'appuyer sur les connaissances de différentes natures présentes dans l'atlas [Brinkley 99] :

- des connaissances générales du domaine (forme, localisation spatiale des structures anatomiques cérébrales, modèles de décision particuliers applicables pour résoudre le problème posé),
- des connaissances instanciées relatives à d'autres sujets, identifiées comme pertinentes vis à vis du problème à résoudre.

Ce processus conduit à *l'interprétation* des faits observés chez le sujet en question. Ce processus transforme les *données* originelles en *informations* qui deviennent alors riches de sens (dans un contexte de travail donné) et

donc potentiellement utiles dans d'autres contextes, ce qui justifie que l'on puisse les considérer comme une forme de *connaissance* à part entière. Cette transformation de données en connaissance soulève de nombreuses questions au plan épistémologique (par exemple [Schmoldt 94, Van Bemmel 96, Prince 96]).

Au plan de la gestion des connaissances, il est important de séparer, chaque fois que c'est possible, les données brutes (donc relativement objectives) et les résultats de traitements et d'interprétations qui en sont faites (forcément subjectives). Cette séparation permet la remise en cause éventuelle d'interprétations antérieures [Bloom 90]. En particulier, il ne nous parait pas judicieux de ré-échantillonner les données images 3D dans un référentiel commun (tel que celui de Talairach), comme ceci a souvent été fait pour faciliter l'accès et la présentation de ces images [Collins 94a]. En effet, ce ré-échantillonnage conduit nécessairement à une distorsion irréversible des images originelles, qui peut dégrader sensiblement la qualité d'opérations de segmentation ou de recalage que l'on souhaiterait leur appliquer ultérieurement.

Au plan fonctionnel la conception de l'atlas en tant que système d'aide à la décision doit nécessairement s'envisager comme un processus évolutif et incrémental. En effet les problèmes cliniques posés sont éminemment complexes et les processus de résolution utilisés ne sont généralement pas formalisés ni formalisables. Seuls des sous-ensembles limités de ces processus peuvent être automatisés, par exemple au plan algorithmique pour la segmentation de structures au sein des images, voire l'identification de structures simples. Le caractère évolutif du système consiste donc à déplacer la frontière entre les tâches réalisées par les agents naturels (utilisateurs) et artificiels (composant logiciels) en "sous-traitant" progressivement à la machine la résolution de sous-problèmes pour lesquels des mécanismes de résolution auront pu être explicités. Dans cette évolution les performances du couple homme-machine augmentent, mais c'est fondamentalement l'homme qui garde le contrôle du processus de résolution global [Gibaud 98, Rialle 95].

Processus de production de nouvelles connaissances (émergence)

Il s'agit des processus visant à *formaliser de nouvelles connaissances* à partir du corpus d'informations thésaurisé au sein du système [Van Bemmel 96]. Ces processus consistent à *modéliser* les faits observés, modélisation qui peut prendre des formes diverses :

- classification en catégories sur la base de propriétés communes (par exemple familles de sillons corticaux présentant certaines caractéristiques structurelles ou morphologiques communes),
- élaboration de modèles numériques sous la forme de cartes de probabilité d'appartenance à une structure anatomique,
- analyse statistique et modélisation de la variabilité d'une structure anatomique.

Ces différents types de modèles constituent une forme de connaissance dans la mesure où ils permettent de résumer, d'expliquer les faits observés. Bien entendu, la fiabilité de ces nouvelles connaissances doit être validée: en particulier, il se peut qu'elles contredisent d'autres connaissances en vigueur dans le système. De tels conflits doivent pouvoir être détectés et traités. Ces nouvelles connaissances peuvent amener à compléter ou à modifier la description de faits antérieurement décrits, en utilisant ou se référant aux nouvelles connaissances. Ceci souligne l'intérêt de pouvoir disposer de mécanismes d'évolution de schéma, permettant la mise à jour de la base de données.

3.3. Perspectives

3.3.1. Introduction : l'internet et la nouvelle donne pour la gestion et le partage des connaissances médicales

Le développement rapide de l'internet et des technologies associées constitue incontestablement l'événemenent majeur de cette fin de siècle pour tous les chercheurs qui s'intéressent au traitement de l'information. Vis à vis de la diffusion de la connaissance, il s'agit d'un événement dont la portée a été comparée à l'invention de l'imprimerie au XVième siècle. Cette explosion est fortement relayée au niveau des médias qui placent ce support au niveau du grand public, au même titre que la presse ou la télévision. Ce phénomène concerne la totalité des pays développés et même en France, il n'est plus d'école ou de communauté de communes qui ne se dotent des moyens d'accès au réseau mondial.

Cette position est aujourd'hui quelque peu décalée par rapport au possibilités réelles de la technologie et des infrastructures notamment en matière de télécommunications. En effet là où on nous parle de son, de multimédia, de vidéo, on extrapole largement au delà de ce qui est possible aujourd'hui compte tenu des débits offerts et des limitations notamment au plan de la Qualité de Service (QoS). En même temps cette appropriation par le grand public constitue le meilleur moteur pour la mise en place d'infrastructures performantes à grande échelle et la promotion des entreprises et des travaux (recherche, normalisation, etc.) qui permettront une utilisabilité réelle de ces nouveaux média.

Comme toutes les révolutions elle n'est pas sans générer une certaine confusion :

- Confusion au niveau des syntaxes de représentation de l'information, car si l'émergence de l'internet a été fondée sur HTML/HTTP, chacun sent bien les limites de cette syntaxe et des protocoles associés. On s'attend donc à ce que cette syntaxe cède le pas à d'autres (XML, XSL et ses dérivés) mais les technologies candidates sont multiples, peu finalisées et souvent divergentes (Schémas XML, XHTML, RDF), ce qui génère une certaine perplexité.
- Confusion au niveau des architectures logicielles, comme ceci a été évoqué précédemment. L'internet (et en particulier le langage Java) introduit des degrés de liberté nouveaux dans la répartition des traitements entre applications serveurs et applications clientes ; il est admis aujourd'hui que cette mutation porte en elle le ferment d'une restructuration profonde de l'industrie du logiciel et de sa distribution. Cette évolution s'est faite de façon concomitante avec le développement d'architectures d'objets distribués (de type CORBA), avec le sentiment - au moins au départ - d'une certaine divergence des approches, elle aussi génératrice de perplexité et donc d'un certain attentisme chez les acteurs industriels.
- Confusion enfin au niveau des informations elle-mêmes : l'internet promeut n'importe quel producteur d'informations au rang de source, sans que des mécanismes de *sélection* - du type de ceux existant dans le domaine de l'édition - ni de *pérennisation* ne soient mis en place. Il s'ensuit une sorte de "jungle informationnelle", où le consommateur (au sens le plus large du terme) a du mal à s'orienter.

Quoi qu'il en soit, les possibilités offertes par l'internet vis à vis du partage, de la ré-utilisation et de la production des connaissances médicales sont immenses et exerceront dans la décennie à venir des mutations profondes, aussi bien sur le plan de l'exercice de la médecine que de l'organisation de la recherche. Les domaines concernés par ces mutations sont illustrés Figure 16, inspirée d'un schéma proposé par Wyatt [Wyatt 96].

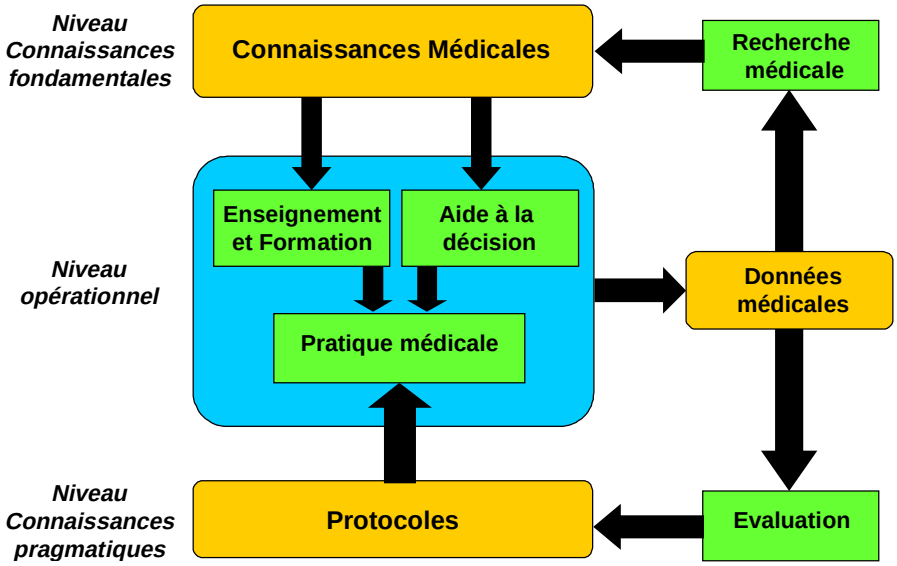


Figure 16. Cycle de production et d'utilisation des données et des connaissances médicales

Impact sur la pratique médicale (utilisation des connaissances)

En ce qui concerne la pratique clinique, le développement de l'internet catalyse l'évolution vers un exercice de plus en plus scientifique de la médecine, consistant à fonder la décision médicale sur des référentiels en terme de pratiques ainsi que sur des connaissances objectives de différentes natures (connaissances générales du domaine, cas antérieurs). On peut penser que, de plus en plus, ces références apparaîtront de façon explicite dans les documents médicaux dans le cadre de la traçabilité des soins, et constitueront l'élément pivôt de l'évaluation des pratiques, que celle-ci soit menée à l'échelle individuelle (justification a posteriori des décisions en cas de litige), ou à l'échelle collective, au niveau d'une institution de soins (accréditation) et au niveau du système de santé tout entier (évaluation de l'efficacité des soins, épidémiologie).

Parallèlement les technologies de l'internet accélèrent l'évolution - déjà largement amorcée - vers un exercice plus coopératif de la médecine, car elles permettent de s'affranchir des distances séparant les acteurs, les données et les connaissances médicales impliqués ou pertinentes pour la résolution d'un problème médical (télémédecine).

Cette double évolution aura un impact majeur sur les processus et donc sur les outils de traitement de l'information. En effet exploiter ou faire référence à des connaissances ou à des cas suppose que ceux-ci soient décrits de façon explicite, avec des référentiels sémantiques partagés entre les applications ou les acteurs humains qui utilisent ces informations. Il faut également que les échanges puissent être réalisés en utilisant une syntaxe commune, capable de représenter des informations complexes, hautement structurées, associant des données numériques (comme des images ou des surfaces mathématiques décrivant la surface de structures d'intérêt) et des données symboliques (attributs descriptifs ou étiquettes renvoyant vers la signification de ces structures d'intérêt).

Impact sur la recherche médicale (production des connaissances)

Au niveau de la recherche, on sent se dessiner une évolution similaire, dans le sens d'une pratique plus rigoureuse et vérifiable des travaux, et une pratique de la recherche en réseau. Cette évolution, déjà perceptible avec le projet de décryptage du génome humain devrait se confirmer dans d'autres domaines scientifiques et notamment le domaine des neurosciences.

En ce qui nous concerne, notre champ d'investigation concerne spécifiquement la neuro-imagerie et l'aide à la préparation de gestes chirurgicaux en neurochirurgie. De ce fait notre champ d'intérêt se situe au carrefour entre le monde de la recherche en neurosciences et le domaine clinique, et on cherchera tout naturellement à faciliter la production et la ré-utilisation des connaissances entre ces deux domaines. Cette question suscite de nombreuses

questions et problèmes organisationnels, déontologiques, etc. Au plan technique le problème principal posé par la mise en commun de données et de connaissances est celui de l'interopérabilité sémantique des systèmes qui échangent ces informations.

Ce problème est bien entendu universel : il concerne la représentation de l'information et la recherche de solutions pragmatiques au décalage (mismatch) sémantique qui découle de l'interprétation de l'information par différents agents cognitifs, qu'ils soient naturels (humains) ou artificiels (composants de systèmes d'information).

C'est une question que nous souhaitons aborder à la fois de façon concrète, c'est-à-dire enracinée dans un champ applicatif cerné (la représentation de données et de connaissances sur le cortex cérébral dans le cadre de l'aide à la préparation de gestes chirurgicaux en neurochirurgie), mais également de façon suffisamment générique, fort de l'expérience - pour nous très positive - du projet MIMOSA. Ces deux facettes sont explicitées dans les deux sections qui suivent et qui concernent la *représentation de données et de connaissances sur le cortex cérébral* et la *fédération de bases d'informations en neuro-imagerie*.

3.3.2. Représentation de données et de connaissances sur le cortex cérébral

Ces travaux se situent dans la continuité des travaux sur la modélisation et de l'utilisation de connaissances anatomiques et fonctionnelles sur le cortex cérébral, selon le cadre général évoqué précédemment dans ce document. Les domaines d'application principaux de ces travaux concernent l'aide à la planification et la réalisation des gestes chirurgicaux et l'enseignement (anatomie, chirurgie). On s'intéressera à différentes formes de connaissances, à savoir connaissances générales du domaine mais également à des connaissances instanciées : cerveaux de sujets sains ou de patients, notamment des patients explorés dans le cadre de la chirurgie de l'épilepsie, qui bénéficient d'explorations anatomiques (IRM) et fonctionnelles (MEG, IRMf) approfondies. On étudiera plus spécifiquement l'anatomie sulco-gyrale et les relations anatomie/fonction dans les régions centrale et frontale inférieure, notamment à cause de leur rôle fonctionnel important sur le plan chirurgical (motricité, somesthésie, langage). Nous utiliserons les données et le savoir-faire précédents pour des études anatomiques ou anatomo-fonctionnelles sur la variabilité du cortex cérébral mais également pour la création de données de référence utilisables pour l'aide à la décision et l'enseignement de l'anatomie et de la neurochirurgie (projet d'Université Médicale Virtuelle).

Etude de la variabilité corticale

On s'intéressera tout particulièrement à la forme de sillons corticaux. Nous cherchons actuellement à quantifier leur variabilité morphologique, en utilisant des techniques d'analyse modale [Barillot 99b], développées dans le cadre d'un projet mené en collaboration avec l'IRISA (coordinateur du projet, C. Barillot), l'INRIA (projet Epidaure Sophia-Antipolis) et le MNI[32] (Montréal). Ces techniques permettent de créer des modèles statistiques de sillons à partir d'exemplaires de sillons extraits d'examens IRM réalisés chez des sujets sains, à l'aide d'une méthode dite "du ruban actif", développée au sein de notre équipe par Georges Le Goualher et Christian Barillot [Le Goualher 97, Barillot 98]. Il s'agit de mettre en évidence des modes privilégiés de variation au sein de la population étudiée, après recalage, mise à l'échelle et rééchantillonnage des sillons étudiés.

La Figure 17 montre des premiers résultats obtenus dans le cadre de ce projet. Elle présente sous deux points de vue le premier mode de variation du sillon central gauche extrait d'une base d'apprentissage de 20 sujets. Un prolongement de ce projet consistera à étudier si de tels modèles statistiques de la variabilité morphologique des sillons permettent ou non de rendre compte de la variabilité fonctionnelle du cortex voisin, étudiée au travers de champs magnétiques évoqués en MEG, pour des stimulations somesthésiques et motrices.

[32] MNI : Montréal Neurological Institute

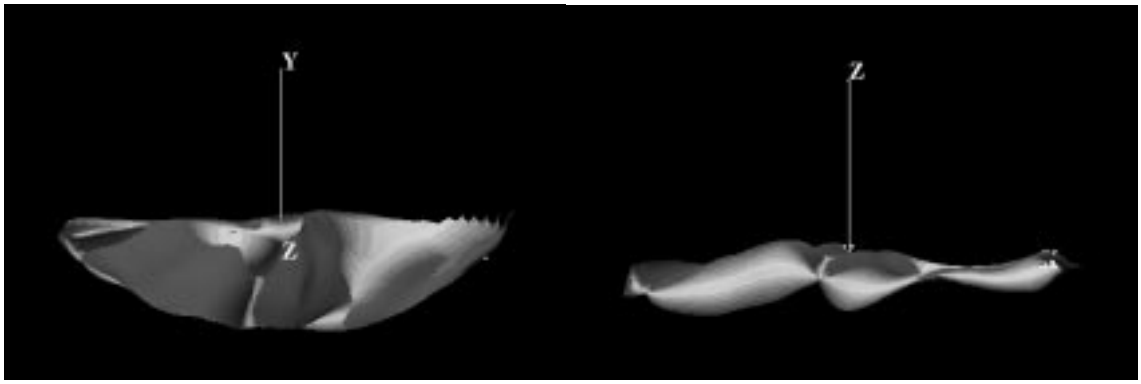


Figure 17. Premier mode de variation du sillon central gauche extrait d'une base d'apprentissage de 20 sujets

Figure 18. Localisations en MEG d'activités somesthésiques au voisinage du sillon central gauche
Cette image montre les sillons centraux droit et gauche en vue latéro-antérieure gauche. Les localisations d'activité, symbolisées par des sphères de couleur, résultent de stimulations somesthésiques du pouce droit (en rouge), de l'index droit (en vert) et de l'auriculaire droit (en bleu).

Nous nous intéressons également à l'étude des asymétries droite/gauche des aires impliquées dans le langage (travaux de Laurent Riffaud). L'objectif ultime de l'étude consiste à examiner si des critères purement anatomiques sur les sillons (forme, position, structure) peuvent suffire à déterminer la dominance hémisphérique pour le langage. On s'appuiera sur une population de patients pour lesquels celle-ci a été déterminée de manière optimale, avec le test à l'amytal (test de Wada).

Les travaux en cours consistent à extraire des paramètres quantitatifs comme la surface, la longueur et la profondeur des sillons situés dans la région antérieure du langage, puis à chercher à mettre en évidence d'éventuelles asymétries. Ceci est effectué à partir des modèles numériques de sillons issus de la méthode "du ruban actif". La Figure 19 présente sur la photo de gauche une vue latérale droite de l'hémisphère droit et sur la photo de gauche la vue latérale gauche de l'hémisphère gauche chez le même patient [Riffaud 99].

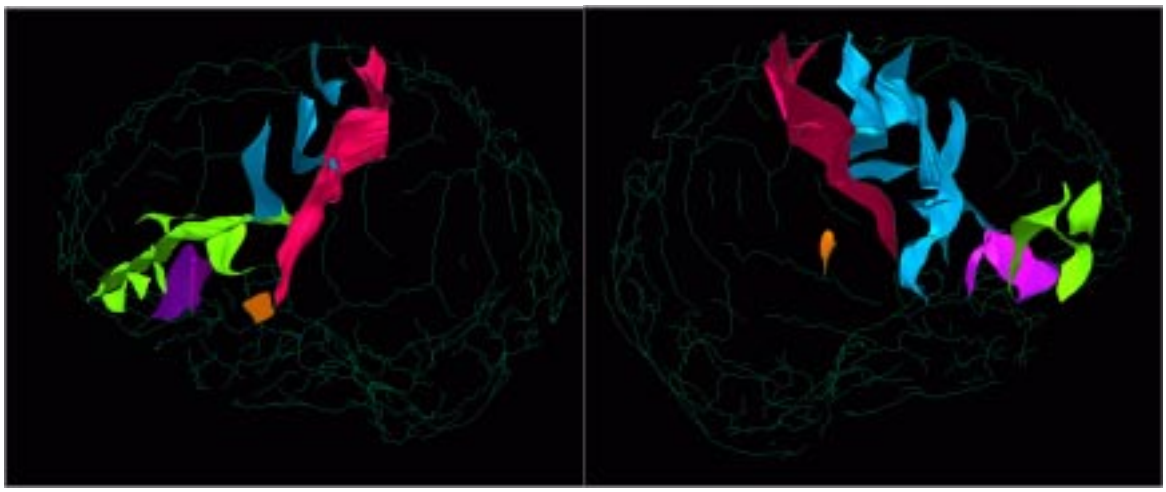


Figure 19. Etude de l'asymétrie droite-gauche des sillons dans la région antérieure du langage

Base de connaissances numérique et symbolique sur l'anatomie sulco-gyrale

Nous nous proposons de concevoir une base de connaissances sur l'anatomie sulco-gyrale. L'originalité de notre approche se situe au niveau de l'articulation numérique/symbolique. Il s'agit de pouvoir associer à des entités comme un sillon particulier des caractéristiques numériques comme une longueur ou une profondeur moyenne, mais également des modèles numériques tels que ceux issus d'un processus de modélisation de type analyse modale (étude des modes de variation) à partir d'une populations de sujets, ou enfin des données relatives à des sujets particuliers (sujets sains ou patients) retenus pour leur caractère typique ou atypique.

Nous nous appuierons sur des systèmes terminologiques et des ontologies reconnues sur le plan international en particulier Neuronames, développée à l'Université de Washington à Seattle [Bowden 95], et intégrée depuis 1995 à UMLS (Unified Medical Language System) [UMLS 96, Rosse 98, Batrancourt 98]. Ce travail sera mené en collaboration avec Anita Burgun et Pierre Le Beux de l'équipe PROTIMES [Burgun 00]. Nous analyserons les limitations de cette ontologie au regard de nos besoins, et le cas échéant nous proposerons les extensions nécessaires.

Le choix des outils est particulièrement important ; nous aurons recours à des outils facilitant la communication, sur le plan sémantique et syntaxique. Ainsi nous utiliserons UML (Unified Modeling Language) pour l'ensemble des travaux de modélisation d'informations (diagrammes de classes ou d'objets) ou de systèmes (cas d'utilisation et diagrammes de séquences). Enfin nous utiliserons XML pour la représentation des connaissances symboliques - qu'il s'agisse de connaissances générales du domaine ou de descriptions de sujets particuliers - et VRML (Virtual Reality Modeling Language) pour la représentation des objets modélisés par des surfaces. En terme d'outils d'accès et de visualisation nous utiliserons les outils et protocoles du web pour faciliter la diffusion et l'utilisation dans différents contextes (aide à la décision, enseignement).

3.3.3. Fédération de bases d'informations en neuro-imagerie

Il s'agit principalement d'étudier comment des bases d'informations en neuro-imagerie, conçues indépendamment les unes des autres peuvent être fédérées, de façon à permettre à différentes applications d'y rechercher des données au travers de requêtes complexes.

A l'occasion de l'appel à projets 99 du MENRT sur les Actions Concertées Incitatives "Télémédecine et Technologies pour la Santé" nous avons noué des contacts avec plusieurs équipes intéressées par un tel sujet de recherche : l'INRIA/IRISA à Rennes, les unités INSERM U494 à Paris et U438 à Grenoble, 1'équipe TIMC CNRS 5525 à Grenoble, et enfin, l'INRIA Rhône-Alpes à Grenoble.

Ce projet se focalise sur la définition d'une architecture informatique permettant l'accès et le partage de résultats d'expérimentations de neuro-imagerie entre des bases d'informations hétérogènes, en particulier :

- la recherche d'expérimentations menées selon un protocole donné, pour par exemple permettre la récupération des descriptions détaillées de ces protocoles, pouvoir en examiner les résultats, et le cas échéant accéder aux images associées ;

- la recherche de résultats similaires, par exemple explorations mettant en évidence des réponses évoquées dans une même région anatomique, désignée soit sous forme symbolique (en se référant à des étiquettes renseignant sur les structures concernées) soit sous forme numérique (région dans une image) ; bien entendu les requêtes portant sur les images posent le problème de la mise en correspondance entre individus différents ;
- des recherches transversales de type "fouille de données" pour mettre en évidence d'éventuelles régularités (par exemple d'éventuelles similarités du corpus de protocoles, de résultats et d'images, ou encore d'invariants spatio-temporels).

L'approche générale envisagée s'appuie sur le concept de "service de médiation", introduit par Gio Wiederhold [Wiederhold 92]. Ce service de médiation est fourni par des composants logiciels de type "wrappers" qui ont pour rôle d'assurer l'interopérabilité syntaxique et sémantique entre les applications que l'on cherche à fédérer. Dans cette architecture le médiateur offre une vue globale et unifiée des différentes sources d'information. Un adaptateur est associé à chaque source et joue donc un rôle de traducteur entre chacune des sources et les concepts communs (Figure 20).

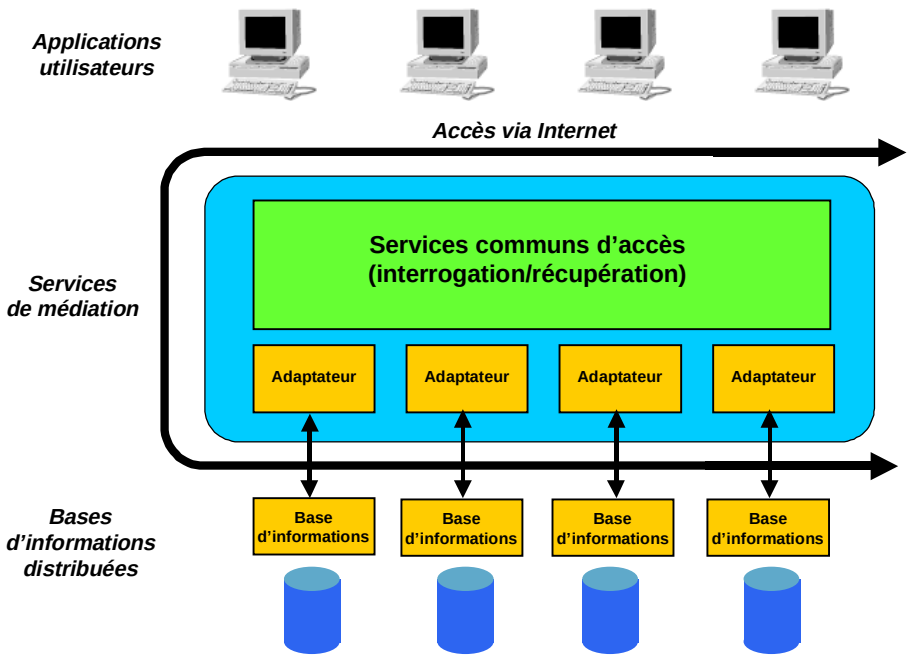


Figure 20. Fédération de bases d'informations distribuées à l'aide de services de médiation

L'étude générale du système proposé commence par l'identification précise de ses fonctions. S'agissant d'un portail d'accès unifié à des données potentiellement hétérogènes il s'agit avant tout de définir les grands types de requêtes que l'on se propose de pouvoir satisfaire (requêtes basées sur les protocoles d'exploration anatomique ou fonctionnelle, requêtes portant sur les résultats de ces explorations ou requêtes mixte de type fouille de données).

Pour cette analyse on s'appuiera notamment sur l'expérience du projet BRAID[33] (Herskovits et Davatzikos) de l'Université John Hopkins. Elle se situe sur le terrain des relations anatomie-fonction, et porte à la fois sur des études de type activation-réponse et sur l'analyse des relations lésion-déficit. Le système proposé intègre des mécanismes d'interrogation complexes, combinant des opérations de sélection sur des critères multiples, de quantification sur les images, ainsi que des tests statistiques pour évaluer les corrélations lésion-déficit. Les études inter-sujet mettent en jeu des méthodes de mise en correspondance linéaires (de type linéaire par morceaux - cf Talairach) et non-linéaires (modèle élastique déformable).

---

[33] BRAID ("Brain Image Database"): http://braid.rad.jhu.edu;

http://www.nimh.nih.gov/neuroinformatics/herkov.cfm

Les fonctions du système étant définies, il s'agira de définir les principaux concepts communs aux différentes bases d'informations à partir desquels seront exprimées les requêtes relatives aux données expérimentales ou cliniques. Ceci concerne à la fois la modélisation des protocoles expérimentaux et la description des résultats des explorations - sous forme numérique (par exemple images anatomiques, cartes d'activations fonctionnelles en IRM*f*, MEG, zones d'intérêt, etc.) - et sous forme symbolique (par exemple étiquettes correspondant à des entités anatomiques, informations qualitatives ou quantitatives de type longueurs, aires, volumes, orientation, etc.).

On s'appuiera pour cela sur les travaux de différentes équipes françaises (Inserm U438 et U494, groupe Cyceron [Diallo 98]) - et américaines, notamment ceux issus du Human Brain Project, comme par exemple ceux de l'Université de Californie du Sud (USC Brain Project[34]) qui se sont déjà intéressés aux problèmes de partage d'ontologies et d'évolution de schémas [Kahng 98].

Pouvoir fédérer entre elles des différentes bases d'information hétérogènes au moyen de "wrappers" suppose de pouvoir articuler les sources de connaissances issues de chaque domaine avec une ontologie commune. Nous chercherons à exploiter au maximum les ontologies existantes au niveau international, en particulier UMLS. En effet des travaux comme le projet ARIANE ont montré que ce type d'approche pouvait être utilisé avec succès malgré le caractère parfois trop générique des concepts présents dans le réseau sémantique de UMLS [Joubert 98]. En ce qui concerne les référentiels sémantiques dans le domaine de l'anatomie on s'appuiera sur les travaux de Rosse et Brinkley de l'Université de Washington à Seattle [Rosse 98], qui prolongent les éléments déjà existants dans UMLS, ainsi que sur les travaux de Jakobovits utilisant une approche similaire au sein du même groupe pour la recherche et l'accès aux données dans un environnement web [Jakobovits 97a, Jakobovits 97b].

Une étape intéressante pourra consister à valider ce type d'approche au moyen d'une implémentation sous la forme de portail XML.

Au delà du problème d'accès à des données de type résultats d'exploration en neuro-imagerie, il sera tentant de chercher à partager des connaissances d'une autre nature, comme des modèles de décision, pour franchir un pas supplémentaire dans l'aide que peut apporter le système dans la résolution de problèmes d'interprétation d'images, par exemple outils de reconstruction d'images, de quantification et de fusion. La recherche et l'activation de ces outils dans le cadre de systèmes fédérés posent toutefois de nombreux problèmes - sémantiques (formalisation des buts et des contextes d'application et d'activation des outils partagés) et architecturaux [Parmentier 98, Aubry 98, Aubry 99] ; en effet, l'image avec les gros volumes d'informations qu'elle met en jeu, rajoute encore une dimension de complexité au plan architectural.

[34] USC Brain project : http://www-hbp.usc.edu/

3.4. Références

[Aubry 98] Aubry F., Chameroy V., Di Paola R. : Ontologies and models for the handling of medical images: application to image databases, in *Medical Image Databases*, S. Wong (ed), Kluwer, 145-172, 1998.

[Aubry 99] Aubry F., Chameroy V., Todd Pokropek A., Di Paola R. : Design of an ontology for medical image manipulation: an exemple applied for DICOM extensions, Medical Imaging 99, SPIE Vol. 3662, 60-71, 1999.

[Bajcsy 89] Bajcsy R. and Kovacic S., Multiresolution Elastic Matching, *CVGIP*, vol. 46, 1-21, 1989.

[Banerjee 87] Banerjee J., Kim W., Kim K.J., Korth H.F. : Semantics and implementation of schema evolution in object-oriented databases, Proceedings of the ACM SIGMOD Int. Conf., San Francisco, California, 311-322, 1987.

[Barillot 84] Barillot C. : Méthodes de reconstruction tri-dimensionnelle et de synthèse d'images appliquées à la représentation des structures morphologiques en médecine, Thèse de doctorat de 3ième cycle, Université de Rennes I, 1984.

[Barillot 85a] Barillot C., Gibaud B., Scarabin J.M., Coatrieux J.L. : Three dimensional reconstruction of cerebral blood vessels, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 5(12), 13-19, 1985.

[Barillot 85b] Barillot C., Gibaud B., Scarabin J.M., Coatrieux J.L. : Photogrammétrie et synthèse d'images 3D pour la représentation du réseau vasculaire cérébral. *ITBM*, Vol. 6(2), 159-166, 1985.

[Barillot 87] Barillot C., Gibaud B., Le Certen G., Bouliou A., Collorec R., Velut S. : 3-D Modeling and Computer Graphics : an approach directed to teaching and therapy planning, *ITBM*, Vol. 8(1), Special issue on Computer Graphics in Medicine, J.M. Scarabin, J.L. Coatrieux (eds.), 121-132, 1987.

[Barillot 88] Barillot C., Gibaud B., Lis O., Luo L.M., Bouliou A., Le Certen G., Collorec R., Coatrieux J.L.: Computer graphics in medicine : a survey, *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineerin*g, Vol. 15(4), 269-307, 1988.

[Barillot 90] Barillot C., Lemoine D., Gibaud B., Toulemont P.J., Scarabin J.M. : A PC Software to confront multimodality images and a stereotactic atlas in neurosurgery: Medical Imaging IV, Newport Beach (USA), SPIE Vol 1232, 188-199, 1990.

[Barillot 93] Barillot C., Lemoine D., Le Briquer L., Lachmann F., and Gibaud B. : Data fusion in medical imaging: merging multimodal and multipatient image, identification of structures and 3D Display aspects, *European Journal of Radiology*, Vol. 17, 22-27, 1993.

[Barillot 94] Barillot C., Gibaud B., Montabord E., Garlatti S., Kanellos I.: An Information System to Manage Anatomical Knowledge and Image Data about Brain, SPIE Vol 2359, Visualization in Biomedical Computing, 424-434, 1994.

[Barillot 98] Barillot C., Gibaud B., Le Goualher G., Morandi X.: Représentation mixte numérique/symbolique des sillons corticaux, 11ième Congrès RFIA 98, Clermont-Ferrand, 165-174, 1998.

[Barillot 99a] Barillot C. : Fusion de données et imagerie 3D en médecine, Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes I, 1999.

[Barillot 99b] Barillot C., Le Goualher G., Hellier P. and Gibaud B. : Statistical analysis of brain sulci based on active ribbon modeling, SPIE Medical Imaging, New Port Beach, Vol. 3661, 312-321, 1999.

[Batrancourt 98] Batrancourt B. : Modélisation et implantation informatique pour la création d'une base de données anatomiques et fonctionnelles du cerveau humain, Mémoire de DEA "Informatique Médicale", 1998.

[Bertino 91] Bertino E., Martino L. : Object-Oriented database management systems: concepts and issues, *Computer*, Vol. 24 n°4, 33-47, 1991.

[Bloom 90] Bloom F.E. : Databases of brain information, in *Tree-dimensional neuroimaging*, edited by Arthur W. Toga, Raven Press, 273-306, 1990.

[Bohm 91] Bohm C., Greitz T., Seitz R., Eriksson L. : Specification and selection of regions of interest (ROIs) in a computerized brain atlas, *Journal of cerebral Blood Flow and Metabolism*, Vol. 11, A64-A68, 1991.

[Bohm 92] Bohm C., Greitz T., Thurfjell L. : The role of anatomic information in quantifying functional neuroimaging data, *Journal of Neural Transmission*, Vol. 37, 67-78, 1992.

[Bookstein 91] Bookstein F.L. : Thin-Plate Splines and The Atlas Problem For Biomedical Images, in *Information Processing in Medical Imaging, Lecture Notes in Computer Sciences Vol.511*, A.C.F. Colchester and D.J. Hawkes (eds.), Springer-Verlag, Berlin, 326-342, 1991.

[Bowden 95] Bowden D.M., Martin R.F., Neuronames brain hierarchy, *Neuroimage* 2, 63-83, 1995.

[Brinkley 93] Brinkley J.F., Eno K., and Sundsten J.W. : Knowledge-based client-server approach to structural information retrieval: the Digital Anatomist Browser, *Computers Methods and Programs in Biomedecine*, 131-145, 1993.

[Brinkley 99] Brinkley J.F., Wong B.A., Hinshaw K.P., Rosse C. : Design of an anatomy information system, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.19, n°3, 38-48, 1999.

[Burgun 00] Burgun-Parenthoine A. : Thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes I, 2000.

[Carlsen 91] Carlsen I.C., Imme M., Kuhn M.H., Ottenberg K.and Schmidt K.H. : Knowledge based Interpretation of cranial MR images, in: Lemke HU, Inamura K., Jaffe CC, Felix R. (eds.), Computer Assisted Radiology, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 277-282, 1991.

[Chandrasekaran 93] Chandrasekaran B. : Generic tasks and task structures : history, critique and new directions, in J.M. David, J.P. Krivine, et R. Simmons (ed.), *Second Generation Expert Systems*, Springer Verlag, 232-272, 1993.

[Christensen 95] Christensen G.E., Rabbitt R.D., Miller M.I., Joshi S.C., Grenander U., Coogan T.A., and Van Essen D.C. : Topological properties of smooth anatomic maps, in *Computational Imaging and Vision: Information Processing in Medical Imaging*, vol. 2432, Y. Bizais, C. Barillot, and R. Di Paola, eds., Kluwer Academic Publishers, 101-112, 1995.

[Collins 94a] Collins D.L., Neelin P., Peters T.M., Evans A.C. : Automatic 3D intersubject registration of MR volumetric data in standardized Talairach space, *Journal of Computer Assisted Tomography*, Vol 18, n°2, 192-205, 1994.

[Collins 94b] Collins D.L., Peters T.M., Evans A.C. : An automated 3D non-linear deformation procedure for determination of gross morphometric variability in human brain, Visualization in Biomedical Computing, Vol. 2359, R.A. Robb (ed), SPIE Press, 180-190, 1994.

[Collins 95] Collins D.L., Evans A.C., Holmes C. and Peters T.M. : Automatic 3D segmentation of neuro-anatomical structures from MRI, in *Computational Imaging and Vision: Information Processing in Medical Imaging*, vol. 2432, Y. Bizais, C. Barillot, and R. Di Paola, eds., (Kluwer Academic Publishers, 1995), 139-152, 1995.

[David 93] David J.M., Krivine J.P., Simmons R. : Second generation expert systems: a step forward in knowledge engineering, in J.M. David, J.P. Krivine, et R. Simmons (ed.), *Second Generation Expert Systems*, Springer Verlag, 3-24, 1993.

[Diallo 98] Diallo B. : Conception, réalisation et exploitation d'une base de données en neuroimagerie cognitive, Thèse de doctorat d'université, Université de Caen, 1998.

[Ducournau 90] Ducournau R. : Y3, Version 3, Sema Group, Montrouge, 1990.

[Evans 91] Evans A.C., Marrett T.S., Torrescorzo J., Ku S., and Collins D.L.,MRI-PET Correlative Analysis Using A Volume Of Interest (Voi) Atlas, *J. of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, Vol. 11, A69-A78, 1991.

[Fox 85] Fox P.T., Perlmutter J.S., Raichle M.E. : A stereotactic method of anatomical localization for positron emission tomography, *Journal of Computer Assisted Tomography*, Vol. 9, n°1, 141-153, 1985.

[Garlatti 95] Garlatti S., Montabord E., Gibaud B., Barillot C.: A methodological approach for object knowledge bases. Expert Systems 95, Cambridge, Edited by M.A. Bramer, J.L. Nealon, R. Milne, Research and Developments in Expert Systems XII, 201-214, 1995.

[Garlatti 96] Garlatti S., Montabord E., Gibaud B., Barillot C. : Base de connaissances intensionnelle avec perspectives et héritage multiple, Congrès RFIA 96, Rennes, 495-503, 1996.

[Gee 94] Gee J.C., Barillot C., Le Briquer L., Haynor D.R., and Bacjsy R. : Matching Structural Images of the Human Brain using Statistical and Geometrical Image Features, presented at SPIE, Visualization in Biomedical Computing, SPIE Vol 2359, 191-204, 1994.

[Gibaud 82] Gibaud B., Scarabin J.M., Lorig B., Cruette C. : Accurate use of CT scanner, stereotaxis and photogrammetry for diagnosis and treatment of cerebral lesions (tumors). *International archives of photogrammetry* 14, 5, 225-235, 1982.

[Gibaud 83] Gibaud B. : Etude et réalisation d'un système d'analyse d'informations radiologiques tridimensionnelles tomodensitométriques, stéréotaxiques et stéréoscopiques, Thèse de doctorat d'ingénieur, Université de Rennes I, 1983.

[Gibaud 84] Gibaud B., Barillot C., Scarabin J.M. : Photogrammétrie et synthèse d'images 3D pour la représentation du réseau vasculaire cérébral. Forum des Jeunes Chercheurs, Lille, 1984.

[Gibaud 98] Gibaud B., Garlatti S., Barillot C., Faure E. : Computerised brain atlases as decision support systems: a methodological approach. *Artificial Intelligence in Medicine* 14, 83-100, 1998.

[Höhne 92a] Höhne K.H., Bomans M., Riemer M., Schubert R., Tiede U., and Lierse W. : A volume based anatomical atlas, *IEEE Comp. Graphics & Appl.*, vol. 12, 72-78, 1992.

[Höhne 92b] Höhne K.H., Pommert A., Riemer M., Schiemann Th., Schubert R., Tiede U., and Lierse W. : Framework for the generation of 3D anatomical atlases, SPIE Vol. 1808, Visualization in Biomedical Computing, 510-520, 1992.

[Jakobovits 97a] Jakobovits R. : Integrating Heterogeneous Autonomous Information Sources. *Univ. of Washington Technical Report*, UW-CSE-971205, 1997.

[Jakobovits 97b] Jakobovits R. and Brinkley J.F. : Managing Medical Research Data with a Web-Interfacing Repository Manager. In *Proceedings of Annual Fall Symposium of American Medical Informatics Association*, Nashville, 454-458, 1997.

[Joubert 98] Joubert M., Fieschi M., Robert J.J., Volot F., Fieschi D. : UMLS-based conceptual queries to biomedical information databases: an overview of the project ARIANE, *Journal of the American Medical Informatics Association*, Vol. 5, 52-61, 1998.

[Kanellos 94] Kanellos I., Garlatti S., Gibaud B., Barillot C.: The Atlas Project: A joint Industrial and Scientific Development under the Cognitive Paradigm of Information Processing, Proc. 1st Eur. Conf. on Cognitive Science in Industry, Luxembourg, 451-466, 1994.

[Kahng 98] Kahng J. and McLeod D. : Dynamic Classificational Ontologies: mediation of information sharing in Cooperative Federated Database Systems. In Michael P. Papazoglou and Gunter Schlageter (eds), *Cooperative Information Systems: Trends and Directions*, Academic Press, London, United Kingdom, 179-203,1998.

[Kikinis 96] Kikinis R., Shenton M.E., Iosifescu D.V., McCarley R.W., Saiviroonporn P., Hokama H.H., A. Robatino, D. Metcalf, C.G. Wible, C.M. Portas, R.M. Donnino and F.A. Jolesz : A digital brain atlas for surgical planning, model-driven segmentation and teaching, *IEEE Transactions on visualization and computer graphics*, Vol 2, n°3, 232-241, 1996.

[Le Goualher 97] Le Goualher G., Barillot C., Bizais Y. : Three-dimensional segmentation and representation of cortical sulci using active ribbons, *Int. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol.11, n°8, 1997.

[Lehman 91] Lehmann E.D., Hawkes D.J., Hill D.L.G., Bird C.F., Robinson G.P., and Colchester A.C.F. : Computer aided interpretation of SPECT images of the brain using an MRI derived 3D neuro-anatomical atlas, *Medical Informatics*, Vol. 16, 151-166, 1991.

[Lemoine 91a] Lemoine D., Barillot C., Gibaud B., Pasqualini E. : An anatomical-based 3D registration system of multimodality and atlas data in neurosurgery, *Lecture Notes in Computer Science* Vol 511, Information Processing in Medical Imaging, A.C.F. Colchester & D.J. Hawkes Eds, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 154-164, 1991.

[Lemoine 91b] Lemoine D. : La modélisation anatomique tri-dimensionnelle et son utilisation pour l'interprétation de données in-vivo multimodalités : application à la neurochirurgie, Thèse de doctorat d'université, Université de Rennes I, 1991.

[Marino 91] Marino O. : Classification d'objets composites dans un système de représentation de connaissances multi-point de vue, Congrès de Reconnaissance des Formes et d'Intelligence Artificielle, RFIA, Lyon, 1991.

[Masini 89] Masini G., Napoli A., Colnet D., Léonard D., Tombre K. : Les langages à objets, InterEditions, Paris, 1989.

[Mazziotta 93] Mazziotta J.C., Toga A.W., Evans A.C., and Fox P. : A Probabilistic Reference System for the Human Brain, Application to the Human Brain Project: Phase I, 1993.

[Mazziotta 95] Mazziotta J.C., Toga A.W., Evans A.C., Fox P., and Lancaster J.L. : A Probabilistic Atlas of the Human Brain: Theory and Rationale for its development, *Neuroimage*, 89-101, 1995.

[Montabord 93] Montabord E, Gibaud B., C. Barillot, S. Garlatti, I. Kanellos, B.S. Wu, A. Biraben, X. Morandi.: An Hypermedia System to Manage Anatomical Knowledge about Brain. in: Lemke HU, Inamura K., Jaffe CC, Felix R. Eds., Computer Assisted Radiology 93, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 414-419, 1993.

[Montabord 95] Montabord E., Gibaud B., Barillot C. : HYPER-YAKA : Hypermedia et base de connaisances sensible au contexte. Congrès “Langages et Modèles à Objets”, Nancy,153-171, 1995.

[Montabord 96] Montabord E. : Base de connaissances, hypermedia et contexte. Thèse de doctorat d'université, Université de Rennes I, 1996.

[Natarajan 91] Natarajan K., Cawley M.G., and Newell J.A. : A knowledge based system paradigm for automatic interpretation of CT scan, *Medical informatics*, Vol. 16, 167-181, 1991.

[Niggemann 90] Niggemann J. : Analysis and representation of neuroanatomical knowledge, *Applied artificial intelligence*, n°4, 309-336, 1990.

[Nowinski 97] Nowinski L., Fang A., Nguyen B.T., Raphel J.K., Jagannathan L., Raghavan R., Bryan R.N. and Miller G.A., Multiple brain atlas database and atlas-based neuroimaging system, *Computer Assisted Surgery*, Vol 2, n°1, 42-66, 1997.

[Ono 91] Ono M., Kubik S., and Abernathey C.D., *Atlas of the cerebral sulci*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1991.

[Parmentier 98] Parmentier T., Ziébelin D., Rechenmann F. : Environnement de résolution de problèmes distribué, 11ième Congrès RFIA 98, Clermont-Ferrand, 265-274, 1998.

[Penney 87] Penney D.J., Stein J. : Class modification in the GemStone object-oriented database management system, Proceedings of OOPSALA'87, Orlando, Florida, 111-117, 1987.

[Prince 96] Prince V., *Vers une informatique cognitive dans les organisations, le rôle central du langage*, Editions Masson, 1996.

[Rialle 95] Rialle V. : Cognition and Decision in Biomedical Artificial Intelligence: From Symbolic Representation to Emergence, *Artificial Intelligence and Society*. Vol. 9, n°2, 138-160, 1995.

[Riffaud 99] Riffaud L. : Etude morphologique IRM in vivo de l'asymétrie droite-gauche des sillons cérébraux au voisinage de la région antérieure du langage à l'aide de leur modélisation sous la forme de rubans actifs, DEA de Sciences Chirurgicales, Université Paris XI, 1999.

[Robinson 93] Robinson G.P., Colchester A.C.F., and Griffin L.D. : Model-Based Recognition of Anatomical Objects from Medical Images, in *Lecture Notes in Comp. Science: Information Proc. in Med. Imag.*, vol. 687, H. Barrett and A. Gmitro, eds., Springer-Verlag, 197-211, 1993.

[Rosch 75] Rosch E., Mervis C.B. : Family resemblances : studies in the internal structure of categories, *Cognitive Psychology*, Vol 7, 573-605, 1975.

[Rosse 98] Rosse C., Mejino J.L., Modayur B.R., Jakobovits R., Hinshaw K.P., Brinkley J.F. : Motivation and organizational principles for anatomical knowledge representation, *Journal of the American Medical Informatics Association*, 5(1):17-40, 1998.

[Sandor 97] Sandor S., Leahy R. : Surface-based labeling of cortical anatomy using a deformable atlas, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, Vol. 16, n°1, 41-54, 1997.

[Schaltenbrand 77] Schaltenbrand G. and Wahren W. : *Atlas for stereotaxy of the human brain*, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1977.

[Schmidt 93] Schmidt H.G. and Boshuizen H.P.A. : On Acquiring Expertise in Medecine, *Education Psychological Review*, 205-221, 1993.

[Schmoldt 94] Schmoldt D.L., Rauscher H.M. : A knowledge management imperative and six supporting technologies, *Computers and electronics in agriculture*, Vol 10, 11-30, 1994.

[Schreiber 94] Schreiber P., Wielinga B., de Hoog R., CommonKADS: a comprehensive Methodology for KBS Development, *IEEE expert*, Vol. 6, N° 9, 28-37, 1994.

[Seitz 90] Seitz R.J., Bohm C., Greitz T., Roland P.E., Eriksson L., Blomqvist G., Rosenqvist G., and Nordell B.: Accuracy and precision of the computerized brain atlas programme for localization and quantification in Positron Emission Tomography, *Journal of cerebral blood flow and metabolism*, 443-457, 1990.

[Simmons 93] Simmons R. and Davis R. : The Roles of Knowledge and Representation in Problem Solving, in *Second Generation Expert Systems*, J.M. David, J.P. Krivine, and R. Simmons (eds.), Springer Verlag, 27-45, 1993.

[Skarra 86] Skarra A.H., Zdonik S.B. : The management of changing types in an object-oriented database, Proceedings of OOPSALA'86, 138-147, 1986.

[Sokolowska 86] Sokolowska E. and Newell J.A. : Multi-Layered Image Representation: Structure and Application in Recognition of Parts of Brain Anatomy, *Pattern Recognition Letters*223-230, 1986,.

[Staemmler 93] Staemmler M., Claridge E., and Cornelis J. : SAMMIE: Software applied to multimodal images and education, presented at IMAC 93, Berlin, 91-98, 1993.

[Subsol 96] Subsol G., Thirion J.P. and Ayache N. : Application of an automatically built 3D morphometric brain atlas: study of cerebral ventrical shape, Visualization in Biomedical Computing 1996, Hamburg, *Lecture notes in computer science*, Vol 1131, K.H. Höhne and R. Kikinis, eds., Springer Verlag, 374-382, 1996.

[Szikla 77] Szikla G., Bouvier G., and Hori T. : *Angiography of the human cortex*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1977.

[Talairach 88] Talairach J. and Tournoux P. : *Co-Planar Stereotactic Atlas Of The Human Brain*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1988.

[Thirion 98] Thirion J.P. : Image matching as a diffusion process: an analogy with Maxwell's demons, *Medical Image Analysis*, Vol. 2, n°3, 243-260, 1998.

[Thompson 96] Thompson P. and Toga A.W. : Visualization and mapping of anatomic abnormalities using a probabilistic brain atlas based on Random fluid transformations, Visualization in Biomedical Computing 1996, Hamburg, *Lecture notes in computer science*, Vol 1131, K.H. Höhne and R. Kikinis, eds., Springer Verlag, 384-392, 1996.

[Toga 91] Toga A.W. : A Three-Dimensional atlas of structure/function relationships, *Journal of chemical neuroanatomy*, 313-318, 1991.

[UMLS 96] National Library of Medicine. UMLS knowledge sources, 7th ed. Unified Medical Language System. Bethesda, MD, 1996.

[Van Bemmel 96] Van Bemmel J.H. : Medical Informatics: art or science ?, *Methods of Information in Medicine*, Vol. 35, 157-172, 1996.

[Wiederhold 92] Wiederhold G.: Mediators in the Architecture of Future Information Systems. *IEEE Computer*, 25(3):38-49, 1992.

[Wielinga 92] Wielinga B., Schreiber A., Breuket J. : KADS: a modeling approach to knowledge engineering, *Knowledge acquisition*, Vol. 4, 5-53, 1992.

[Willamovski 94] Willamovski J. : Modélisation de tâches pour la résolution de problèmes en coopération système-utilisateur, Thèse de doctorat d'université, Université Joseph Fourier, Grenoble, 1994.

[Wyatt 96] Wyatt J. : Medical Informatics, artefacts or science ?, *Methods of Information in Medicine*, Vol. 35, 197-200, 1996.

[Yapi 96a] Yapi J.H. : Evolution de schéma dans les systèmes de gestion de bases de données orientés objet. Application à la description d'images anatomiques cérébrales, Thése de doctorat d'université, Université de Rennes I, 1996.

[Yapi 96b] Yapi J.H., Lasquellec A., Gibaud B., Bosc P. : Evolution de schéma et adaptation des instances. 3ième Colloque Africain sur la Recherche en Informatique (CARI 96), Libreville (Gabon), 1996.

[Yapi 96c] Yapi J.H., Lasquellec A., Gibaud B. : Evolution de schéma et migration d'instances. Prise en compte des besoins d'une application médicale. Congrès Bases de Données Avancées (BDA 96), Cassis (France), 1996.

[Zachmann 91] Zachmann H.H. : Interpretation of cranial MR images using a digital atlas of the human head, in: Lemke HU, Rhodes M.L., Jaffe CC, Felix R., eds., Computer Assisted Radiology, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 283-287, 1991.

[Zicari 91] Zicari R. : A framework for schema updates in an object-oriented database system, IEEE Conf. on data engineering, 213, 1991.

4. Conclusion

Ce document traite principalement de l'interopérabilité des équipements et composants logiciels d'imagerie au sein de systèmes d'information intégrés. Cette interopérabilité s'avère indispensable pour le partage de données et de connaissances médicales dans le domaine de l'imagerie, et conditionne le déploiement de systèmes d'information intégrés dans les entreprises de santé et au sein des réseaux de soins, pour la délivrance des soins, l'aide à la décision, la production de nouvelles connaissances.

Avec le recul d'une quinzaine d'années on mesure le chemin accompli depuis les expériences pionnières de PACS au début des années 80. Certes les PACS sans films ne sont toujours pas légion, de même que les hôpitaux sans papier ne sont sans doute pas pour demain. En revanche il est aujourd'hui aisé de communiquer les images médicales entre les sources qui les produisent et les stations de traitement, et de mettre en œuvre au sein des plateaux techniques d'imagerie une véritable gestion des images, incluant la gestion du workflow et l'archivage. Ces progrès sont largement dus aux avancées de la standardisation (standard Dicom), elles-mêmes obtenues grâce aux travaux de recherche menés sur les PACS, travaux à caractère à la fois académique et expérimental.

Ces progrès ont été obtenus dans le cadre d'une standardisation sectorielle, pragmatique, au prix toutefois de larges impasses - comme par exemple : la sécurité des informations (contrôle d'accès), le lien entre les images et les informations cliniques, les aspects d'intégration avec le reste du système d'information hospitalier. Les travaux de standardisation menés selon une approche globale (CEN TC 251) ont eux aussi beaucoup progressé au cours de la dernière décennie mais sans donner lieu - à ce jour - à un déploiement industriel significatif.

Au plan syntaxique l'interopérabilité tend de plus en plus à reposer sur des solutions technologiques non spécifiques du domaine de la santé - et donc a fortiori du domaine de l'imagerie médicale. De plus en plus, ces solutions se situent à un niveau "méta" - on parle alors de méta-standards comme XML ou CORBA - ce qui condamne, à terme, les solutions spécifiques de type syntaxe Dicom et protocoles de messages Dicom.

Au plan sémantique les choses sont beaucoup plus complexes. Là non plus les solutions les plus sophistiquées et les plus rationnelles (par exemple systèmes terminologiques fondés sur des représentations conceptuelles) ne sont pas celles qui ont nécessairement le plus de succès au plan industriel. Ces développements suscitent encore beaucoup de méfiance et le marché leur préfère souvent des modèles certes plus limités mais plus faciles à maîtriser. Toutefois la pression du marché devient chaque jour plus forte pour atteindre des niveaux d'intégration plus importants et qui nécessitent donc que s'élaborent de nouveaux consensus, tant au plan architectural (rôles respectifs et interactions des composants logiciels) qu'au niveau de la structure et du contenu des informations échangées.

En effet, la définition de standards de contenu (le *quoi*) renvoie inévitablement à la question du traitement de l'information (le *pourquoi*), ce qui n'est pas sans soulever de nombreuses difficultés. En effet, quand on parle de communication ou d'archivage de dossiers patients, ou de représentation de connaissances ré-utilisables dans des contextes multiples, on envisage nécessairement un éventail assez large de traitements d'informations, sans que ceux-ci soient d'ailleurs précisément définis *a priori*. C'est toute l'ambiguïté et la difficulté de cette question. Que recouvrent exactement les termes d'intégration et de ré-utilisation ? S'agit-il d'une simple visualisation d'informations médicales par un utilisateur humain ? S'agit-il pour une application informatique d'extraire d'un message ou d'un document un sous-ensemble pour l'intégrer dans un autre document sans en trahir la sémantique originelle ? S'agit-il pour une application d'aide à la décision d'accéder à des connaissances pertinentes pour les appliquer à la résolution d'un problème donné ? Certaines de ces fonctionnalités (pas toutes) nécessitent que la sémantique des informations soient précisément définie, en référence à des ontologies de domaine ; il peut également être nécessaire que les contextes de production et d'utilisation de ces informations soient explicitement définis, faute desquels l'interopérabilité sémantique ne peut être assurée.

La spécification de ces ontologies de domaine et de ces contextes, et la conception d'agents de médiation capables de les exploiter constituent un domaine de recherche riche pour de nombreuses années.

Au plan pratique, le mérite des technologies en émergence comme XML est qu'elles permettent une migration progressive vers une meilleure interopérabilité sémantique. Il reste pour cela à organiser la recherche des consensus sur les modèles de documents et leur diffusion. C'est certainement le rôle des sociétés professionnelles médicales, plus au contact de la réalité du terrain que les organismes traditionnels de standardisation. Ces derniers gardent néanmoins un rôle clé à jouer dans l'émergence de standards globalement cohérents (notamment au plan architectural) et assurant que les spécificités du traitement de l'information médicale sont convenablement prises en compte.