



HAL
open science

YAKA : un système d'information intensionnel sur le cerveau humain

Serge Garlatti, Ioannis Kanellos, Elisabeth Montabord, Bernard Gibaud,
Christian Barillot

► **To cite this version:**

Serge Garlatti, Ioannis Kanellos, Elisabeth Montabord, Bernard Gibaud, Christian Barillot. YAKA : un système d'information intensionnel sur le cerveau humain. INFORSID'94 : Informatique des Organisations et des systèmes d'information et de décision, 17-20 Mai, Aix en provence, May 1994, Aix En Provence, France. pp.323 - 338. hal-02181270

HAL Id: hal-02181270

<https://hal.science/hal-02181270v1>

Submitted on 12 Jul 2019

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

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

YAKA : un système d'information intensionnel sur le cerveau humain

S. GARLATTI⁽²⁾, I. KANELLOS⁽²⁾, E. MONTABORD^(1, 2), B. GIBAUD⁽¹⁾, Ch. BARILLOT⁽¹⁾,

¹ Laboratoire SIM Faculté de Médecine, 2 avenue du Pr. Léon Bernard, 35043 Rennes Cedex, France. (e-mail : barillot (ou gibaud)@univ-rennes1.fr).

² Laboratoire I.A. et Systèmes Cognitifs, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne, ZI de Kernevent, BP 832, 29285 Brest Cedex, France. (e-mail : Garlatti (ou Kanellos ou Montabor)@liasc.enst-bretagne.fr). (*)

Résumé : Cette étude a pour objet la réalisation d'un système d'informations sur le cerveau humain, destiné notamment à assister les neurologues et neurochirurgiens dans le traitement chirurgical de pathologies. Ce système comprend une base de connaissances, une base de données, contenant des examens de patients, des outils de traitement et de visualisation d'images, et un système hypermédia. L'article présente un système à base de connaissances intensionnel, muni d'une stratégie de résolution des conflits d'héritage à deux niveaux par désignation explicite, et fondé sur le paradigme de représentation objets. Ce dernier est organisé en perspectives disjointes, correspondant à différents domaines médicaux. Une relation d'égalité extensionnelle relie respectivement des objets abstraits de différentes perspectives. Chaque objet représente le prototype d'un concept dans un domaine donné et lui confère donc une sémantique unique. Cette organisation permet de distinguer deux types de conflits : conflits sémantiques (inter-domaines) et conflits sur des valeurs (intra-domaines).

Mots clés : Représentation des Connaissances, Atlas Cérébral, Conflit d'Héritage, Perspectives

Abstract : The aim of this project is to design an information system about the brain in order to assist neurosurgeons in the treatment of pathologies. That system is composed of a knowledge base, a data base containing patient examination, image tools and a hypermedia system. In this paper, we focus our attention on the intensional knowledge base which possesses a resolution strategy of inheritance conflicts in two stages by means of an explicit designation. The knowledge base is organised by means of separate perspectives or domains. Each object represents the prototype of a concept in a particular domain and then possesses a unique semantic. Objects which stand for the same concept in different domains are connected with an extensional equality relation. Such organisation enable us to distinguish two types of conflict: semantical conflict between domains and value conflict in one domain. Thus the enlargement of the knowledge base seems to be more easy in a domain or by adding new domains.

Key words : Knowledge Representation, Computerized Brain Atlas, Inheritance Conflicts, Perspectives

(*) Nous souhaitons remercier MM J.-M. Scarabin et P. Toulouse pour leur aide intellectuelle dans les diverses phases de validation scientifique de ce projet, ainsi que M. Ducournau pour tous ses conseils. Nous exprimons également toute notre gratitude au conseil régional de Bretagne pour son soutien.

1. Introduction

Cette étude a pour objet la réalisation d'un système d'information sur le cerveau humain, destiné, notamment, à assister les neurologues et neurochirurgiens dans le traitement chirurgical de pathologies, telles que les épilepsies focales. Ce système, en cours d'implantation, se compose d'une base de connaissances, d'une base de données, appelée base d'informations sujets et contenant des images in vivo de patients, d'outils de visualisation et de traitement d'images et d'un système hypermédia qui contrôle et permet à l'utilisateur d'accéder aux différents composants. Nous allons ici nous focaliser sur le cœur du système : la base de connaissances. Celle-ci est fondée sur le paradigme de la représentation objets. Elle se constitue d'un ensemble d'objets organisés par un ensemble de relations. La relation d'héritage (relation de généralisation / spécialisation) sera ici le centre de nos préoccupations. Chaque objet a statut de prototype ([Dubois 91], [Garlatti Kanellos 93], [Mervis Rosch 81]) et est défini par un ensemble de propriétés ou couples (attribut / valeur) dont certains expriment des relations.

Un système est généralement dit intensionnel s'il permet à un même concept d'être représenté de plusieurs façons (intensions), caractérisées par des propriétés différentes. Les diverses représentations d'un concept sont reliées par une relation d'égalité extensionnelle, appelée, suivant les auteurs, "coréférence" ([Ferber 88], [Ferber Volle 88], [Brachman Schmolze 85]), "passerelle" ([Marino 89], [Marino et al. 90]) etc. La représentation d'un concept est dépendante du cadre conceptuel du domaine médical concerné (neuroanatomie, neurologie, neurophysiologie, neurochimie, cytoarchitectonie, ...) qui donne une sémantique unique à cette représentation. La relation d'égalité extensionnelle autorise une organisation de la base de connaissances par domaines quasi-indépendants (appelés "perspectives" dans TROPES : [Marino 89]). Cette organisation permet de rendre la base de connaissances plus évolutive, aussi bien au sein de chaque domaine que par l'ajout de nouveaux domaines. Dans un tel cadre, nous proposons un système à base de connaissances intensionnel, muni d'une stratégie de résolution des conflits d'héritage à deux niveaux par désignation explicite.

Les conflits d'héritage sont la source de nombreux travaux dans le cadre des systèmes de représentation objets ([Bobrow et al. 77], [Bobrow Stefik 83], [Carré Comyn 88], [Carré et al. 90], [Dekker Carré 92], [Ducournau Habib 89], [Ducournau et al. 93], [Dugerdil 88], [Dugerdil 91], [Goldstein Bobrow 80], [Nguyen Rieu 91], [Rieu et al. 91]). Dans ce système les conflits d'héritage sont autorisés et appartiennent à deux catégories différentes¹ : celle des conflits sémantiques et celle des conflits sur des valeurs. Les conflits sémantiques sont des conflits sur des attributs de même nom ayant des sémantiques différentes. Pour un domaine donné, la sémantique d'un attribut est unique. Cette organisation par domaines départage donc explicitement les deux types de conflits : l'un, **inter-domaine**, est un conflit sémantique ; l'autre, **intra-domaine**, est un conflit sur des valeurs.

Dans une première partie, nous présentons la problématique du projet afin d'en préciser les objectifs ainsi que les différentes fonctions de ses composants. Puis l'organisation par domaines de la base de connaissances est analysée et ses caractéristiques sont précisées. Après une présentation des différentes natures de conflit, nous proposons une stratégie de résolution de conflit à plusieurs niveaux. Enfin, les prolongements de ce travail sont discutés.

¹ Ce sont les deux types de conflits identifiés jusqu'à présent dans ce projet

2. Le projet YAKA

Ce projet vise à concevoir un système d'information médical sur le cerveau humain qui se compose d'une base de connaissances, d'une base de données, d'outils de visualisation et de traitement des images, et d'un système hypermédia. Les domaines d'application potentiels d'un tel système d'information sont divers : ils concernent la recherche fondamentale sur le fonctionnement cérébral, mais, également, les applications médicales, à des degrés multiples, allant depuis l'amélioration de techniques de segmentation d'images médicales numériques (par l'utilisation de modèles de connaissances sur les structures à détecter) jusqu'à la réalisation de systèmes à base de connaissances orientés vers l'aide au diagnostic ou l'aide à la décision thérapeutique.

Sur un plan très général, la constitution d'un système à bases de connaissances de ce type se révèle difficile du fait, d'une part, de l'extrême complexité de l'organisation du système nerveux central de l'homme et, d'autre part, de la multiplicité des domaines qui permettent de l'aborder (anatomie, physiologie, biochimie, étude comportementale etc) : un chirurgien, un neurologue ou un neurochimiste s'intéressent à des aspects différents de l'organisation du cerveau. De plus, la conjonction de plusieurs domaines d'étude sur un même concept du cerveau peut soulever des problèmes de vocabulaire. Des composants du cerveau peuvent porter, selon les disciplines, des noms différents, ou les mêmes termes peuvent faire référence à des connaissances de natures différentes. Un des problèmes rencontrés est celui de la variabilité inter-individuelle (tous les cerveaux ne sont pas identiques) et la limite éminemment floue entre le typique et l'atypique, le normal et le pathologique. Un autre tient au fait que l'organisation du cerveau est encore mal connue et que la frontière entre ce qui est connu est ce qui ne l'est pas est difficile à définir : par exemple, certaines connaissances bien établies chez l'animal ne sont pas forcément transposables chez l'homme. Par ailleurs, les descriptions de certaines structures anatomiques peuvent varier selon les auteurs. Enfin, la difficulté se trouve aussi dans l'aspect évolutif de ce projet : des connaissances élaborées à partir des études sur les données représentées dans la base d'informations sujets viendront enrichir la base de connaissances. De plus, de nouveaux domaines d'étude doivent pouvoir être abordés pour des applications médicales ou de recherche.

C'est pourquoi, il nous a semblé raisonnable de commencer par cerner quelques champs d'applications particuliers qui délimiteront quelques domaines et certaines informations dans ces domaines. Nous nous proposons donc d'aborder la constitution de ce système selon les deux aspects suivants :

1. l'aide à l'étiquetage des structures corticales (gyri et vaisseaux) dans des images IRM et angiographiques, sous des formes manuelle ou assistée ;
2. l'étude des corrélations morphologiques et fonctionnelles dans la chirurgie de l'épilepsie.

Le premier aspect inclut la réalisation d'une base de connaissances anatomique. Il présente un intérêt indiscutable : i) sur le plan clinique, dans une perspective de planning thérapeutique assisté par ordinateur (neurochirurgie stéréotaxique ou radiochirurgie) et ii) sur le plan de la recherche, pour progresser dans la mise en œuvre d'algorithmes d'interprétation d'images basés sur des connaissances symboliques. Le second est plus prospectif : il inclut la définition de bases de connaissances anatomiques et fonctionnelles, susceptibles d'aider à confirmer ou à rejeter des hypothèses relatives à la mise en jeu de régions cérébrales pendant le déroulement d'une crise d'épilepsie. Ces deux aspects relèvent principalement des domaines de la neuroanatomie, de la neurophysiologie et de la neurologie. Néanmoins, il pourra s'avérer nécessaire d'inclure dans l'avenir d'autres domaines qui interviendraient pour ces traitements (neurochimie, par exemple).

Au vu de ces objectifs, le système sera constitué d'une base de connaissances visant à décrire les concepts du cerveau, d'une base de données ou base d'informations sujets, d'outils de visualisation et de traitements d'images, et d'un hypermédia (figure 1). La base d'informations sujets est actuellement en cours d'élaboration. Elle gèrera les données brutes ou étiquetées (IRM, angiographies, EEG, MEG ...) recueillies lors d'examens réalisés chez des patients ou des sujets sains. A cette fin, elle contiendra un modèle anatomique du cerveau humain et sera basée sur un SGBDOO. Elle permettra aussi de représenter des informations statistiques issues de ces données. La base de connaissances sera progressivement enrichie par l'exploitation des données issues de la base d'informations sujets.

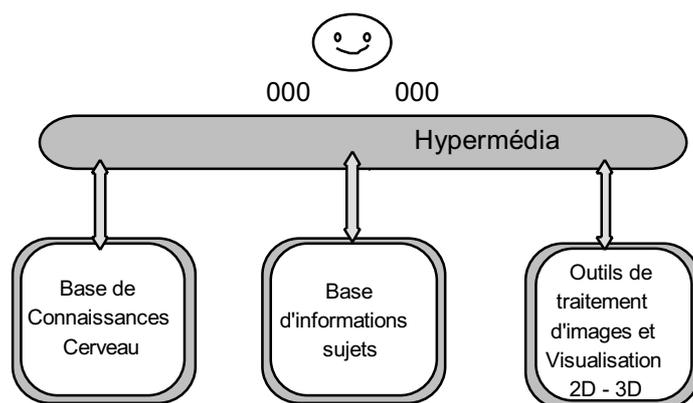


Figure 1 : Organisation générale du système

Les outils de traitement et de visualisation d'images 2D et 3D permettent de délimiter des zones d'intérêt dans les images issues de la base d'informations sujets, d'étiqueter des concepts du cerveau référencés dans la base de connaissances et de permettre leur visualisation bi- ou tri-dimensionnelle.

Nous avons choisi de mettre en place un système hypermédia, support du dialogue entre le médecin et le système d'information. Cet outil convivial est capable de présenter des informations, aussi diverses que des images, du texte, des données numériques ou symboliques, et d'utiliser les images comme support privilégié pour la désignation des entités sur lesquelles on désire obtenir des informations. Il constitue, de plus, une interface vers les autres composants du système d'informations. La navigation au sein de l'hypermédia utilise le réseau de relations entre les objets définis dans la base de connaissances.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés d'une part à l'organisation de la base de connaissances, en se limitant à quelques aspects représentatifs des domaines anatomique et neurologique, et, d'autre part, à l'élaboration de l'hypermédia. Cette base de connaissances devant tenir compte des problèmes pré-cités, nous avons alors opté pour un langage de représentation objets, Y3 [Ducournau 88]. Nous avons élaboré une première maquette de la base de connaissances, représentant les connexions thalamo-corticales¹ ainsi que l'organisation spatiale des gyri du cortex², et proposé une première approche de l'hypermédia. Celui-ci permet de

¹ Ces connexions sont des voies de propagation de signaux entre le thalamus qui est un noyau gris profond et le cortex ; les noyaux jouent le rôle de relais pour la propagation des signaux.

² La partie supérieure du cerveau forme le cortex ; ce dernier apparaît sous forme de circonvolutions qui se décomposent en gyri - une circonvolution particulière. Ils sont délimités par des espaces appelés sillons.

naviguer d'un type d'information à un autre (textes, images, graphes) en utilisant les concepts représentés dans la base de connaissances. Il offre au médecin la possibilité de désigner une structure anatomique particulière sur des planches d'atlas représentant le cerveau en coupe selon les trois directions de l'espace (frontal, axial, sagittal). Ce mode d'accès s'inspire de la procédure habituelle utilisée par ces médecins ([Montabond et al. 93]).

L'évaluation de cette maquette a mis en évidence la nécessité d'offrir à l'utilisateur les moyens d'accéder aux informations qui lui sont pertinentes, selon son domaine et ses objectifs spécifiques ; en effet, la pertinence d'une information ne peut être évaluée que dans un domaine donné et par rapport à une tâche précise. Ces résultats préliminaires ont inspiré notre travail sur la base de connaissances et son organisation en domaines. Dans la suite, nous présentons l'architecture générale de la base de connaissances et une stratégie de résolution des conflits inter- et intra-domaines.

3. Architecture générale de la base de connaissances

La base de connaissances est fondée sur le paradigme de la représentation objets. Les connaissances sont représentées par un ensemble d'objets organisés par un ensemble de relations. Parmi ces dernières, on trouve la relation de généralisation / spécialisation, les relations de composition, les relations spatiales (par exemple entre gyri et sillons), les relations d'afférence et d'efférence de structures telles que le thalamus et le cortex. Toutes les relations n'induisent pas une hiérarchie entre les objets comme la relation de généralisation / spécialisation et les relations de composition. La hiérarchie induite par la relation de généralisation / spécialisation est appelée graphe d'héritage. Un objet est décrit par un ensemble fini de propriétés (plus formellement des prédicats n-aires) qui sont des couples de type <attribut, valeur(s)> ; certaines propriétés expriment des relations entre objets. Seuls les attributs spécifiques à un objet sont déclarés dans ce dernier - les autres étant accessibles par le mécanisme d'héritage ou de partage de d'attributs. Ce mécanisme permet de retrouver l'ensemble des propriétés d'un objet grâce à un parcours du graphe d'héritage à travers ses ancêtres - objets plus abstraits. Nous allons dans un premier temps spécifier le graphe d'héritage de la base de connaissances, donner ses caractéristiques principales et définir l'architecture de la base de connaissances.

Soit G le graphe d'héritage de la base de connaissances défini de la manière suivante : $G = (X, H)$ avec X l'ensemble des objets, où $X = Y \approx Z$ tel que Y est l'ensemble des objets abstraits (ou classes) et Z l'ensemble des objets individuels (ou instances), H l'ensemble des arcs où $H = H' \approx H''$ tel que H' est l'ensemble des liens "est-un" entre objets abstraits et H'' l'ensemble des liens "membre-de" entre un objet individuel et des objets abstraits. Soit \preceq_H l'ordre partiel induit par la relation H ; si $x \preceq_H y$ on dira que y est un ancêtre de x ou que x est un descendant de y . Pour un objet donné $\alpha \in X$, son graphe d'héritage ou sa hiérarchie est $G(\alpha) = (X_\alpha, H_\alpha)$, où $X_\alpha = \{x : x \in X, \alpha \preceq_H x\}$, l'ensemble de ces ancêtres (incluant α). Soit le graphe $G' = (Y, H')$ avec H' l'ensemble des liens "est-un" entre objets abstraits et Y l'ensemble des objets abstraits. Tous les objets peuvent être définis dans ce type de représentation en intension ou en extension. L'intension d'un objet x , notée $Int(x)$ est égale à toutes les propriétés déclarées dans x plus toutes celles qui sont héritées par x dans $G(x)$. Un objet abstrait x possède une extension propre notée $Ext_p(x)$ qui contient tous les objets individuels qui sont ses descendants et une extension au sens large notée $Ext(x)$ qui contient tous les descendants de x - objets abstraits ou individuels. Les graphes G et G' possèdent les caractéristiques suivantes :

- $\forall y_1, y_2 \in Y$ tels que $y_1 \preceq_H y_2 \Rightarrow Ext(y_1) \supseteq Ext(y_2)$.

- et $\forall y \in Y$ et $\forall z \in Z$ tels que $z \leq_H y \iff z \in \text{Ext}_p(y)$.

Les neurochirurgiens sont plus directement concernés par la localisation des structures anatomiques et les rapports qu'elles entretiennent entre elles. Les neurologues s'intéressent davantage aux structures anatomiques à travers leur fonction, ou leur participation au sein d'un ensemble fonctionnel. Les neurochimistes s'intéressent aux substances (neurotransmetteurs, neuromodulateurs) produites par les tissus nerveux et qui interviennent ou modulent le fonctionnement des synapses, ainsi qu'aux récepteurs de ces substances et aux groupements de neurones qui les produisent ou les transportent. Enfin les neurophysiologistes étudient le fonctionnement neuronal dans son ensemble et s'intéressent donc à la fois aux aspects électriques et neurochimiques de la transmission de l'influx nerveux.

Dans les représentations objets, il existe plusieurs modèles dont les modèles "classe / instance" et les modèles basés sur la notion de "prototype". Etant donné la grande variabilité des structures du cerveau entre individus, il n'est pas possible de dégager les propriétés communes d'un concept ; par conséquent, un modèle de type classe / instance est moins adéquat qu'un modèle de prototype. En effet, un prototype est un objet abstrait, associé à un concept, qui réalise une sorte de "résumé" du concept considéré. Inversement, à chaque concept il est associé au moins un prototype. C'est le prototype qui partage le plus de propriétés avec tous les individus appartenant au concept, sans que ces derniers partagent entre eux, ni a fortiori avec le prototype, un ensemble de propriétés communes. Ce statut de prototype pour un objet va donc avoir des conséquences sur le mécanisme d'héritage qui doit permettre d'exprimer le non partage de propriétés. Ce dernier induit un raisonnement non monotone, traité grâce au masquage ([Ducournau Habib 89], [Garlatti 93]) et aux exceptions sur les propriétés¹ ([Ducournau et al. 90], [Garlatti 91], [Garlatti Kanellos 93]). Le non-partage de propriétés permet de caractériser, d'une part, des structures normales du cerveau qui ne partagent pas avec un prototype toutes ses propriétés et, d'autre part, des structures pathologiques qui a fortiori ne partagent pas avec un prototype certaines de ses propriétés.

Comme nous l'avons vu précédemment, le cerveau peut être abordé au travers de nombreux domaines (neuroanatomie, neurologie, neurophysiologie, neurochimie, cytoarchitecture, ...). Chaque domaine analyse le cerveau avec des propriétés différentes en s'établissant une taxinomie propre avec des concepts généralement différents. Dans le cadre de cette étude, il s'agit d'établir une sorte de taxinomie ou classification des concepts relatifs au cerveau humain, restreinte aux applications pré-citées. Par ailleurs, un prototype est dépendant du domaine. Certains concepts sont présents dans plusieurs domaines - référencés avec un même nom ou des noms différents. Ces concepts sont alors décrits par des propriétés différentes dans chaque domaine, mais possèdent la même extension quelque soit le domaine. On associe, précisément, un seul prototype par domaine à chaque concept. Un objet représente alors le prototype d'un concept dans un domaine donné et lui confère une sémantique unique. Nous pouvons ainsi avoir une base de connaissances intensionnelle, c'est-à-dire une base dans laquelle les concepts ont une même extension, représentée par des objets différents, chacun décrit par des propriétés différentes. Il est nécessaire d'ajouter une relation d'égalité extensionnelle entre ces objets afin d'explicitier le fait qu'ils référencent une même extension. Ce type de relation a déjà été précédemment analysé et étudié ([Desclés Kanellos 90], [Ferber 88], [Ferber Volle 88], [Marino et al. 90]).

¹ Le traitement des exceptions sur les propriétés n'est pas traité dans ce papier, mais est abordé dans la conclusion, comme une extension de cette étude.

3.1. Organisation par domaine

Cette relation d'égalité extensionnelle permet de structurer la base de connaissances par domaines. Chaque domaine est représenté par une hiérarchie disjointe de celles des autres domaines suivant une organisation qui leur permet de conserver une relative indépendance. En effet, l'interaction entre les domaines est actuellement limitée ; il n'existe qu'une seule relation entre certains objets de domaines différents, appelée relation d'égalité extensionnelle. Ainsi, toute insertion d'un nouveau domaine ne devrait pas remettre en cause ceux déjà traités. L'évolution de la base de connaissances sera plus aisée puisqu'elle pourra se faire domaine par domaine sans conséquences structurelles majeures sur les autres domaines. De plus, si cela s'avère nécessaire, des mécanismes d'inférences particuliers en fonction du domaine pourront être mis en place. Cette organisation autorise (contrairement aux perspectives de TROPES ([Marino et al. 90]) dont elle se rapproche) l'héritage multiple dans une perspective et les conflits inter- et intra-perspectives (appelées ici domaines). De manière plus précise, la base de connaissances possède les propriétés suivantes :

- Soient $D = \{\text{neuroanatomie, neurologie, neurophysiologie, neurochimie, ...}\}$ l'ensemble des domaines qui permettent de décrire le cerveau, $d \in D$, $G_d = (X_d, H_d)$, avec X_d l'ensemble des objets du domaine d , où $X_d = Y_d \approx Z_d$, H_d l'ensemble des arcs tel que $H_d = H_d' \approx H_d''$, ces ensembles étant définis comme précédemment, par rapport au domaine d . G_d et $G_d' = (Y_d, H_d')$ qui sont respectivement des sous-graphes de G et G' , ont les propriétés suivantes :
- $\forall d_1, d_2 \in D, Y_{d_1} \leftrightarrow Y_{d_2} = \dots$ et pour tout $d_i \in D, i = 1, \dots, n, n = |D|$ avec $|D|$ le cardinal de D supposé toujours $> 1, \approx_{i=1}^n Y_{d_i} = Y$. Les ensembles Y_{d_i} forment une partition de l'ensemble Y (i.e. l'ensemble de tous les objets abstraits se trouvant dans un $d_i \in D$).
- Chaque graphe G_d' est un graphe orienté sans circuit ; il y a donc, pour chaque domaine, possibilité d'héritage multiple puisqu'un objet peut avoir plusieurs ancêtres.
- Parmi les relations qui structurent les objets abstraits entre eux, on peut distinguer deux types : les relations intra-domaine qui relient des objets appartenant à un même domaine et les relations inter-domaines qui relient des objets appartenant à des domaines différents. Par exemple, les relations "est-un", de composition et de connexion sont des relations intra-domaine. Actuellement, il n'existe qu'une seule relation inter-domaine : la relation d'égalité extensionnelle, notée "Eg-Ext_p" ; cette relation relie deux objets abstraits par la condition suivante : soient $x \in Y_{d_1}$ et $y \in Y_{d_2}$, $((\text{Eg-Ext}_p)(x,y) \in \text{Ext}_p(x) = \text{Ext}_p(y))$; il s'agit d'une relation d'équivalence. Toute modification d'un domaine ou adjonction d'un nouveau domaine nécessite donc de maintenir la cohérence de cette relation entre les domaines.

Cette relation permet de préciser explicitement qu'un concept possède plusieurs représentations dans des domaines différents et offre au système hypermédia un moyen de passer d'un domaine à l'autre et ainsi de donner toutes les représentations d'un concept et leurs propriétés associées. Aucune contrainte n'est associée à cette relation, au contraire de l'étude menée dans [Ferber 88], [Ferber Volle 88], qui utilisent des règles de coréférence comme contraintes sur les valeurs d'attributs propageant ainsi toute modification d'une perspective à une autre ; dans [Marino et al. 90], cette relation, appelée passerelle, établit des contraintes de consistance entre différentes perspectives sans autorisation de conflits. Par contre, dans notre système, les conflits sont autorisés entre les domaines, ainsi que dans un domaine.

- $\exists d_1, d_2 \sqsubseteq D$ tels que $Z_{d_1} \leftrightarrow Z_{d_2}$? ; de plus pour tout $d_i \sqsubseteq D$, $i = 1, \dots, n$, $n = |D|$ avec $|D|$ le cardinal de D , $\approx \prod_{i=1}^n Z_{d_i} = Z$. Contrairement aux objets abstraits, les objets individuels peuvent appartenir à plusieurs domaines, sans que ceci constitue une nécessité. Certains concepts du cerveau sont identifiés dans plusieurs domaines et représentés dans chaque domaine par des objets différents possédant une même extension. Tout objet individuel appartenant à l'extension (propre) d'un objet abstrait y appartiendra obligatoirement à l'extension de tout objet y' , d'un autre domaine, tel que $(\text{Eg-Ext}_p)(y, y')$.

- Parmi les objets abstraits qui représentent des concepts médicaux du cerveau, certains portent le même nom dans plusieurs domaines, d'autres portent des noms différents, ce que nous pouvons exprimer ainsi : soient $d_i \sqsubseteq D$; on note par N_{d_i} l'ensemble des noms désignant les concepts du cerveau identifiés dans un domaine d_i donné. On pose $N \approx \prod_{i=1}^n N_{d_i}$ ($n = |D|$), l'ensemble de tous les noms de concepts du cerveau référencés dans le système ; alors $\exists d_1, d_2 \sqsubseteq D$ tels que $N_{d_1} \leftrightarrow N_{d_2}$? . Si l'on désigne par g_d la fonction qui associe un nom de concept à un objet (abstrait) dans un domaine donné, i.e. $\forall d \sqsubseteq D$, $g_d : Y_d \rightarrow N_d$, g_d est bijective. Par contre, si f désigne la fonction qui associe les noms des concepts aux objets au travers des domaines, i.e. $f : Y \rightarrow N$, alors f est seulement surjective. Il faut bien comprendre qu'il s'agit d'un effet de surface ; en réalité la désignation d'un objet comporte toujours deux paramètres : le nom local à un domaine d qui appartient à Y et Y_d et la référence du domaine auquel appartient cet objet. Par conséquent, seule la paire $(f(\alpha), d)$ permet de désigner un objet de manière unique, avec $f(\alpha)$ le nom local et d le domaine. Il est donc nécessaire de gérer des espaces de noms, un par domaine pour nommer les objets et les attributs - comme nous le verrons ultérieurement.

Par exemple, l'étude du cortex cérébral peut être considérée suivant le cadre de l'anatomie macroscopique ou celui de l'anatomie microscopique (cytoarchitectonie). Le premier renvoie à une découpe en gyri, alors que le second conduit à subdiviser le cortex en zones dans lesquelles l'organisation des cellules en couches est homogène (aires de Brodmann). Ce découpage en aires recouvre parfois le découpage en gyri ; ainsi, l'aire 4 se superpose exactement avec le gyrus précentral. On peut dire dans ce cas qu'il y a égalité extensionnelle entre l'objet "aire 4" (domaine cytoarchitectonique) et l'objet "gyrus précentral" (domaine de l'anatomie macroscopique). Par contre, des structures comme l'hippocampe seront identifiées par un même nom dans des domaines comme la neurologie et neurochirurgie bien que les connaissances auxquelles elles renverront soient qualitativement différentes ; par exemple, en neurologie, l'implication de cette structure dans les processus mnésiques constituera un aspect prévalant alors que, en neurochirurgie, on s'intéressera avant tout aux relations spatiales qu'elle entretient avec d'autres structures du lobe temporal.

L'organisation de la base de connaissances est donc représentable de la façon suivante :

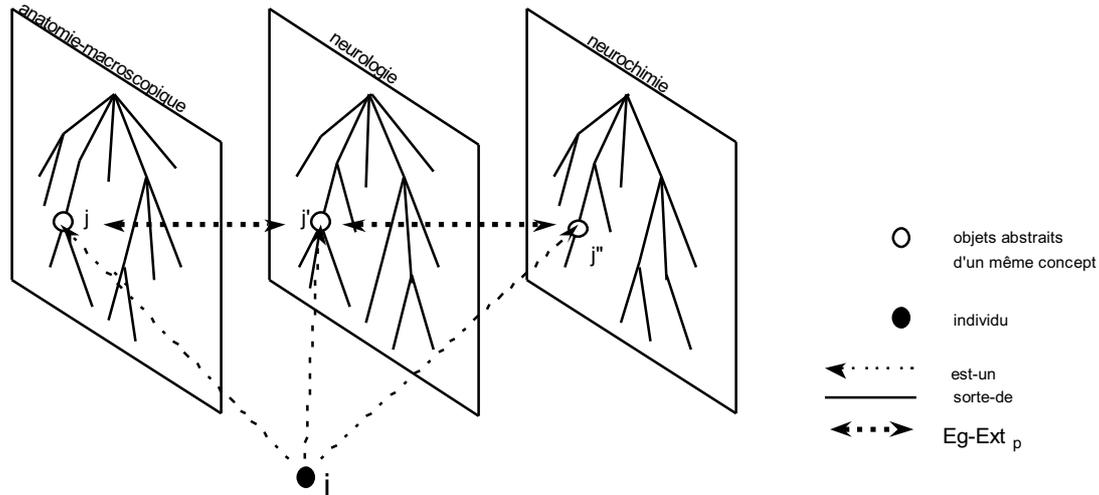


Figure 2 : Organisation de la base de connaissances par domaines

Dans la figure 2, l'individu i est relié aux trois objets j , j' et j'' qui sont extensionnellement égaux. Etant donné que dans un domaine, l'héritage multiple est autorisé, il est possible qu'un individu puisse appartenir à l'extension de plusieurs objets abstraits \equiv_H -incomparables entre eux, dans un même domaine. Cette organisation de la base de connaissances implique pour chaque objet la possibilité d'héritage multiple dans un domaine donné ou à travers plusieurs domaines ; l'héritage multiple induit parfois des conflits, ce qui signifie qu'un objet peut hériter de valeurs différentes pour un même attribut ([Ducournau 89], [Ducournau et al. 93] pour une définition des conflits). Il s'agit maintenant de définir le mécanisme d'héritage et la stratégie de résolution des conflits qui prend nécessairement en compte cette organisation par domaine de la base de connaissances.

4. Mécanisme d'héritage et stratégie de résolution des conflits

Avant de présenter la stratégie de résolution des conflits, nous allons d'abord analyser les différents types de conflits existants : les conflits inter-domaines ou conflits sémantiques et les conflits intra-domaines ou conflits sur des valeurs. D'un domaine à un autre les propriétés qui définissent les concepts sont différentes mais possèdent parfois un même nom. Le mécanisme d'héritage utilise ce nom comme référence pour rechercher la valeur associée à ce nom dans la hiérarchie de l'objet considéré. Comme nous allons le voir, à un domaine donné correspond une sémantique unique des attributs.

Nous allons prendre deux exemples particuliers pour illustrer ces conflits sémantiques : les relations de composition de type portion / masse ([Winston et al. 87], [Markowitz et al. 92]) et la relation de connexion (afférences et efférences¹) entre structures. Puis les conflits intra-domaines ou conflits sur des valeurs seront illustrés par d'autres exemples dans un domaine particulier, avant de présenter le mécanisme d'héritage qui permet de résoudre ces conflits par une désignation explicite, à deux niveaux. De telles stratégies de désignation explicite, souvent appelées "point de vue", ont déjà été appliquée dans ROME [Carré et al. 90], FROME [Carré 91], OBJLOG ([Dugerdil 88], [Dugerdil 91]), SHOOD [Nguyen Rieu 91].

¹ Les connexions entre les structures du cerveau possèdent généralement un sens privilégié et s'appellent afférences lorsque les signaux arrivent dans la structure considérée et efférences lorsque les signaux sortent de la structure considérée.

4.1. Nature des conflits

En anatomie, le corps strié est composé du noyau caudé et du noyau lenticulaire, lui-même formé du putamen et du pallidus. Au niveau anatomique, le noyau caudé et le noyau lenticulaire sont bien distincts, mais, du point de vue fonctionnel, le noyau caudé et le putamen forment une même unité fonctionnelle appelée striatum ; en outre, ces deux structures sont ontogénétiquement d'origine télencéphalique alors que le pallidus est d'origine diencéphalique. Or, le striatum est principalement identifié dans le domaine neurologique, tandis que le corps-strié et noyau-lenticulaire apparaissent essentiellement dans le domaine anatomique (cf Fig 3).

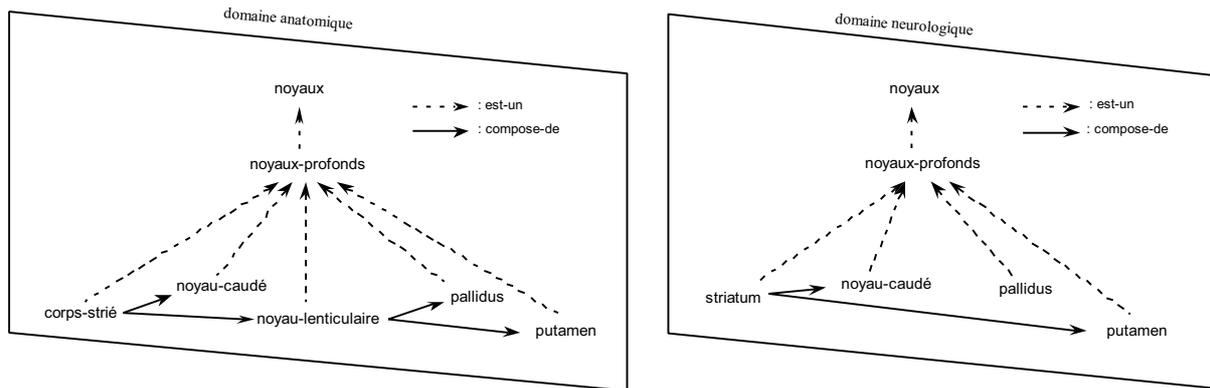


Figure 3 : Relation de composition de type portion / masse en fonction des domaines

Dans la figure 3, la relation "composant-de" (inverse de "composé-de") a les mêmes propriétés logiques dans les deux domaines, mais elle n'a pas la même sémantique. En effet, les causes de ces regroupements ou composition ne sont pas les mêmes dans chaque domaine. Par conséquent, pour le noyau-caudé ou le putamen, ainsi que pour tout descendant de ces objets, la valeur de l'attribut "composant-de" n'est pas la même pour chaque domaine ; en neurologie pour le noyau-caudé la valeur est "striatum" et en anatomie la valeur est "corps-strié".

Ainsi, si l'on s'intéresse aux connexions entre le striatum et la substance noire, on dira que putamen et noyau caudé ont, notamment, des afférences provenant de la substance noire (afférences nigro-striées) et ont des efférences qui gagnent, en particulier, cette même substance noire (fibres strio-nigriques). D'un point de vue neurochimique, on pourra préciser que les afférences nigro-striées sont dopaminergiques et ont un rôle inhibiteur sur le striatum ; en outre, ces fibres prennent naissance dans la pars compacta de la substance noire, où se fait la synthèse de la dopamine. De même, on pourra distinguer parmi les fibres strio-nigriques deux types différents : les unes GABA-ergiques ayant un rôle inhibiteur de la substance noire, les autres facilitatrices, utilisant un autre neurotransmetteur, la substance P ; ces fibres se terminent dans une partie de la substance noire, appelée pars reticulata (cf Figure 4) :

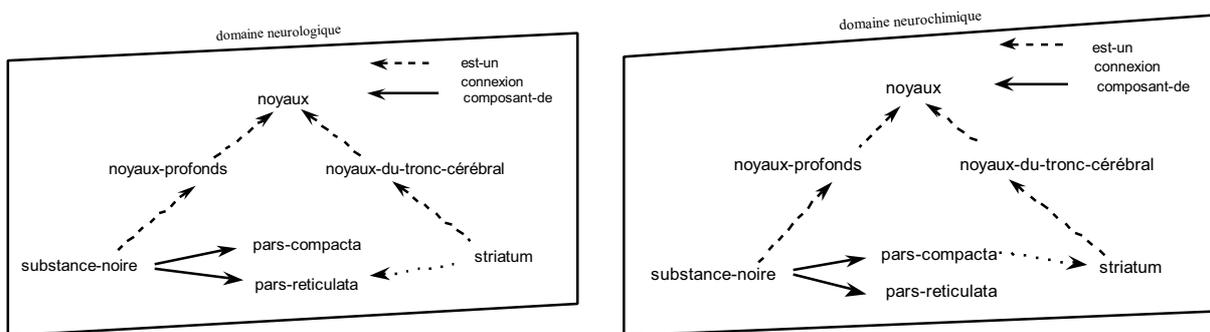


Figure 4 : Relations de connexion entre substance-noire et striatum

Dans la figure 4, la relation de connexion n'a pas la même sémantique dans les deux domaines. La valeur de l'attribut "connexion" n'est donc pas la même dans le domaine neurologique (valeur : "pars reticula") et neurochimique (valeur : "pars compacta").

Comme nous avons pu le voir précédemment, la sémantique d'une relation (composition ou connexion) n'est pas la même dans des domaines distincts et possède, évidemment, des valeurs différentes par domaine. En effet, ce ne sont pas les mêmes processus physiques qui sont mis en oeuvre dans les différents domaines. En d'autres mots, si l'on devait décrire la sémantique des relations par des traits pour chaque domaine, ces traits seraient très différents. A chaque domaine correspond une sémantique unique pour chaque attribut.

Par contre dans un domaine, l'héritage multiple est autorisé et peut être source de conflit. Ce type de conflit porte sur des valeurs. Il peut être notamment dû à des analyses différentes (des variantes) du domaine et ne modifie pas la sémantique des attributs mais peut modifier la valeur de l'attribut.

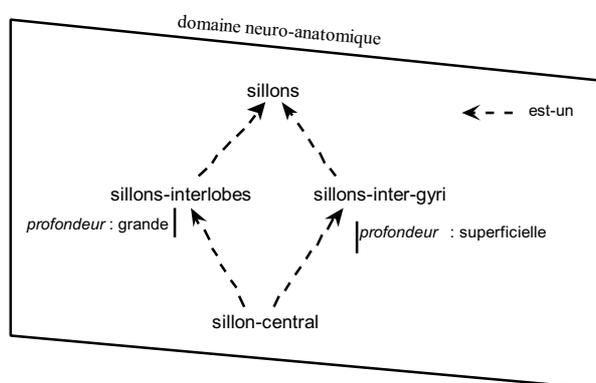


Figure 5 : Exemple de conflit inter-domaine

Dans cet exemple, le sillon central doit hériter de la valeur "grande" pour l'attribut "profondeur". En effet, le sillon-central sépare des gyri (le gyrus-précentral et le gyrus-post-central) et des lobes (le lobe-frontal et le lobe-pariétal) ; le sillon-central est un sillon-interlobes parce qu'il est profond. L'autre valeur présente dans sillons-inter-gyri n'est pas correcte. Il faut donc pouvoir sélectionner la bonne valeur. Une stratégie globale, comme, par exemple, la linéarisation, privilégierait toujours l'héritage par sillons-interlobes ; mais pour une autre propriété, cette stratégie risque de se révéler illicite.

4.2. Stratégie de résolution des conflits

Comme nous avons pu le voir sur les exemples précédents, il existe deux types de conflits : les conflits sémantiques et les conflits sur des valeurs. Dans tous les cas pour un attribut donné, il ne semble pas judicieux de privilégier une valeur par rapport à une autre, par une stratégie globale (par exemple de linéarisation : [DeMichiel Gabriel 87], [Ducournau Habib 89]) : sélectionner celle qui est la plus pertinente à un instant donné semble une solution beaucoup plus naturelle. Notre approche est basée sur une stratégie de résolution des conflits par une désignation qui s'opère sur deux niveaux. Le premier élimine les ambiguïtés sémantiques et le second résout les ambiguïtés sur des valeurs à l'intérieur d'un même domaine.

Parmi les études sur l'héritage multiple, une ([Ducournau Habib 89]) nous intéresse tout particulièrement. Sa généralité est suffisante pour que nombre des notions introduites soient

applicables à la plupart des systèmes à héritage multiple. Nous reprenons donc dans la suite un ensemble de notions ainsi que certains principes.

Le mécanisme d'héritage a pour objet de déterminer la valeur d'un attribut A pour un objet x dans sa hiérarchie G(x). Le principe d'uniformité, proposé dans l'étude en question, est conservé :

Principe 1 : L'héritage est un mécanisme uniforme et s'applique de manière identique pour tous les attributs.

Chaque objet **a** ou **n'a pas** un attribut A (A référence le nom local - à un domaine - d'un attribut). Ceci s'exprime de la manière suivante :

Définition 1 : Un objet α **a** un attribut A :

- si α **possède** l'attribut A (i.e. A est déclarée dans l'objet α)
- ou si α **hérite de** A par sa hiérarchie G(α) (i.e. d'un ancêtre de α possédant l'attribut A).

Un objet α **n'a pas** l'attribut A si α ne possède pas A et n'hérite pas de A.

Nous allons introduire brièvement les notions de masquage et de conflit.

Définition 2 : Soient α un objet, A un attribut et x, y deux ancêtres de α dans G(α) possédant l'attribut A :

- x **masque** y de α pour l'attribut A si $x \leq_H y$.
- x et y **sont en conflit** pour l'attribut A s'ils ne sont pas masqués de α pour A. Bien entendu, x et y sont incomparables dans l'ordre partiel induit par le graphe d'héritage.
- l'ensemble de conflit CS(α , A) est composé des éléments minimaux de G(α) possédant l'attribut A.

Il est clair que si CS(α , A) est vide alors l'objet α n'a pas l'attribut A. Le principe suivant, proposé aussi dans [Ducournau Habib 89], est également maintenu :

Principe 2 : Pour un objet α et un attribut A, le mécanisme d'héritage retourne une seule valeur qui est prise dans un objet de CS(α , A).

Avec ce principe, tout objet n'hérite d'une valeur pour un attribut donné que des objets les plus spécifiques de sa hiérarchie, ceux qui ne sont pas masqués. Dans tous les cas, le problème ne survient que si $|CS(\alpha, A)| > 1$. Le premier niveau de sélection élimine les conflits sémantiques, c'est-à-dire les conflits inter-domaines. Il est donc nécessaire à ce point d'introduire la notion d'ensemble de conflit relativement à un domaine.

Définition 3 : Soient $d \in D$, A un attribut et α un objet ; l'ensemble de conflit relatif au domaine d, noté CS(α , A, d), est l'ensemble de conflit CS(α , A) réduit au sous-graphe $G_d(\alpha)$. Autrement dit, les objets qui n'appartiennent pas au graphe G_d sont exclus de CS(α , A).

L'ensemble CS(α , A, d) possède les caractéristiques suivantes :

- $\forall \alpha \in Y$ et $\forall d \in D$, CS(α , A, d) = CS(α , A), puisque chaque objet abstrait n'appartient qu'à un unique domaine.
- $\exists \alpha \in Z$ et $\exists d \in D$ de sorte que CS(α , A, d) \neq CS(α , A), puisqu'il existe des objets individuels pouvant appartenir à plusieurs domaines.

Le principe suivant constitue le premier niveau de sélection pour la résolution du conflit :

Principe 3 : Pour un objet α et un attribut A, la valeur de l'attribut A ne peut être obtenue qu'à partir d'un objet de $CS(\alpha, A, d)$, $d \sqsubseteq D$.

Plusieurs domaines peuvent posséder un attribut de nom A (localement à un domaine), chacun étant différent des autres - sémantique et représentation différentes. Comme pour la désignation des objets, seul le couple (A,d) permet de désigner explicitement un attribut de nom A particulier et ainsi de lever toute ambiguïté sur l'accès à cet attribut, donc de sélectionner l'ensemble de conflit désiré.

Le second niveau de sélection présuppose bien sûr que $|CS(\alpha, A, d)| > 1$. L'un des objets de cet ensemble de conflit est alors désigné explicitement afin de lever l'ambiguïté sur les valeurs dans le domaine d : si $x (\sqsubseteq X_d)$ est un élément choisi pour résoudre l'ambiguïté sur des valeurs (i.e. la valeur de l'attribut A est donnée par x), nécessairement $x \sqsubseteq CS(\alpha, A, d)$.

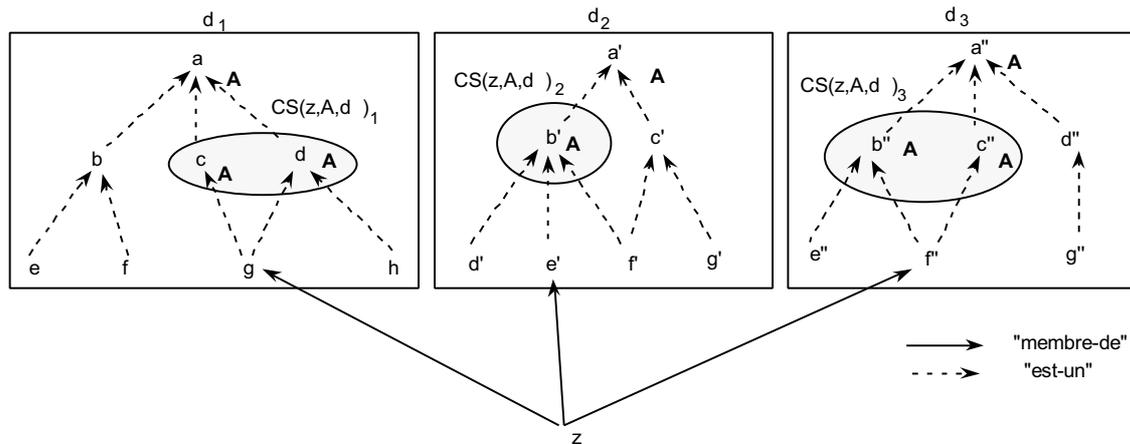


Figure 6 : Exemple de graphe d'héritage avec des conflits intra et inter-domaines

Dans la figure 6 l'ensemble de conflit $CS(z, A)$ est égal à $\{c, d, b', b'', c''\}$. Le premier niveau de sélection choisit un domaine, par exemple d_1 . L'ensemble de conflit relativement à d_1 se réduit à $CS(z, A, d_1) = \{c, d\}$. Ce dernier contient deux objets qui possèdent l'attribut A. Le deuxième niveau de sélection nécessite de choisir c ou d pour hériter de A, en les désignant explicitement. Si l'on s'intéresse à $CS(g, A, d_1)$, ce dernier est égal à $\{c, d\}$ et il faut donc choisir de nouveau entre les deux (i.e. c et d) ; par ailleurs $CS(g, A, d_2)$ est égal à $\{b'\}$. Si z possède l'attribut A, il faut préciser s'il s'agit de A par rapport au domaine d_1, d_2 ou d_3 . En effet, si z possède A avec la sémantique du domaine d_1 seule, alors $CS(z, A, d_1)$ se réduit à $\{z\}$; par contre $CS(z, A, d_3)$ est toujours égal à $\{b'', c''\}$.

Dans une étude ultérieure ([Ducournau et al. 93]), il a été introduit les notions de conflit de valeur et conflit de nom dans un système à héritage multiple sans exception explicite sur les attributs et sans prise en compte de la notion de perspectives. Dans ce cadre, toute propriété possède une identité qui s'hérite. Cette identité possède notamment une certaine sémantique en relation avec le monde "réel". Soit l'ensemble de conflit $CS(\alpha, A)$ qui est égal à $\{x, y\}$, deux cas peuvent se présenter : (1) x et y ont un ancêtre commun qui possède l'attribut A ; (2) x et y n'ont aucun ancêtre commun possédant l'attribut A. La distinction entre les deux types de conflits se fait de la manière suivante : 1) x et y hérite pour l'attribut A d'une même identité, il s'agit donc d'un conflit de valeur puisque A possède entre autres caractéristiques une même sémantique en x et en y ; 2) x et y ont a priori au moins des sémantiques différentes, il s'agit donc d'un conflit de nom. Les conflits inter-domaines correspondent donc à des conflits de nom et les conflits intra-domaines à des conflits de valeur (en faisant abstraction des autres caractéristiques attachées à la

notion d'identité). Le système OBJLOG ([Dugerdil 88], [Dugerdil 91]) traite les conflits sémantiques mais sans respecter toujours le principe 2. Par contre, FROME [Carré 91] traite les deux types de conflit mais sans les distinguer. Ces deux systèmes ne prennent pas en compte pas la notion de perspectives.

5. Conclusion et perspectives

Dans ce projet, l'architecture proposée, qui organise la base de connaissances par domaines relativement indépendants, offre les avantages suivants :

- La claire séparation entre les domaines facilite l'évolution de la base de connaissances, tant domaine par domaine que par l'ajout de nouveaux domaines qui ne remettront pas en cause ceux déjà traités.
- La base de connaissances est volontairement intensionnelle, ce qui rend la notion d'égalité extensionnelle nécessaire ; d'autre part, la sémantique d'un objet abstrait est unique puisqu'elle correspond au prototype d'un concept dans un domaine particulier. En réalité, les propriétés d'un prototype sont corrélées et forment une sorte de "tout indivisible" à l'intérieur d'un domaine.
- La distinction des deux types de conflit d'héritage, conflits sémantique et conflits sur des valeurs, est directement prise en compte dans l'organisation par domaines. En effet, les conflits sémantiques sont des conflits inter-domaines et les conflits sur des valeurs des conflits intra-domaines.
- La stratégie de résolution des ambiguïtés, basée sur la notion d'ensemble de conflit, permettra d'intégrer directement un mécanisme de gestion des exceptions explicites sur les attributs nécessaire à la gestion des prototypes ([Ducournau 90], [Garlatti 93a]). En effet la sémantique opérationnelle de ces exceptions est définie à partir de la notion d'ensemble de conflit.

La stratégie de résolution des conflits sera étendue au partage d'attributs au travers de différents types de relation, telles que la relation de composition ([Winston et al. 87], [Markowitz et al. 92]). Pour chaque type de relation, les propriétés logiques sont les mêmes pour tous les domaines, mais avec une sémantique différente par domaine. Chaque relation induit une hiérarchie et un partage d'attributs différent selon les domaines, éventuellement générateur de conflits.

La base de connaissances offre donc au système hypermédia un premier niveau de sélection des informations directement exploitable, à savoir le domaine. De plus le système hypermédia utilisera toutes les relations de la base de connaissances afin de naviguer et d'accéder aux informations pertinentes ; l'égalité extensionnelle joue ici un rôle fondamental et assurant la possibilité de naviguer d'un domaine à un autre.

6. Bibliographie

- [Bobrow et al. 77] D.G. Bobrow, R. Kaplan, M. Kay, D.A. Norman, H. Thompson, T. Winograd, "GUS, a frame-driven dialog system", pages 155-173, Artificial Intelligence 8 1977.
- [Bobrow Stéfik 89] D. G. Bobrow, M. S. Stefik, The LOOPS Manuel, Memo KB-VLSI-81-13, Xerox PARC, 1983.
- [Brachman Schmolze 85] R.J. Brachman, J.G. Schmolze , "An overview of the KL-ONE representation system", pages 171-216, Cognitive Science, 9:2, 1985.

- [Carré Comyn 88] B. Carré, G. Comyn, "On Multiple Classification, Points of View and Object Evolution. p 49-62, 1988.
- [Carré Dekker 90] B. Carré, L. Dekker, J-M. Geib, Multiple and Evolutive Representation in the ROME Language", 1990.
- [Dekker Carré 92] L. Dekker, B. Carré, "Multiple and Dynamic Representation of Frames with Points of View in FROME.", RPO 92, p 97-111, 1992.
- [DeMichiel Gabriel 87] L.G. de Michiel, R.P. Gabriel, "The Common Lisp Object System : An Overview", pages 201-222, ECOOP'87, 1987.
- [Desclés Kanellos 90] J.P Desclés, I. Kanellos, "Structural effects of typicality : an operative approach", Cognitiva, AFCET, Madrid nov. 1990
- [Dubois 91] D. Dubois, "Catégorisation et Cognition: '10 ans après', une évaluation des concepts de Rosch", in Sémantique et cognition : catégories, prototypes, typicalité edited by d. Dubois, Edition du CNRS, pp 31-54, 1991.
- [Ducournau 88] R. Ducournau, "Y3", version 3.5, SEMA-GROUP, Novembre 1990.
- [Ducournau Habib 89] R. Ducournau, M. Habib, "La multiplicité de l'héritage dans les langages à objets", TSI, Vol 8, n° 1, Janvier 1989.
- [Ducournau et al. 90] R. Ducournau, S. Garlatti, M. Habib, "Linear-time algorithms and nonmonotonic reasoning in hierarchies", Cognitiva 90, Novembre 1990.
- [Ducournau Habib 91] R. Ducournau, M. Habib, "Masking and conflicts or to inherit is not to own !", in "Inheritance Hierarchies in Knowledge Representation and Programming Languages", Edited by M. Lenzerini, D. Nardi and M. Simi, Viareggio, février 1989, John Wiley (1991) 223-244.
- [Ducournau et al. 93] R. Ducournau, M. Habib, M. Huchard, M. L. Mugnier, A. Napoli, "L'héritage Multiple dans tous ses états", à paraître dans TSI.
- [Dugerdil 88] P. Dugerdil, "Contribution à l'étude de la représentation des connaissances fondée sur les objets", Thèse Sci. Math. et Informatique, Université d'Aix Marseille II, 1988.
- [Dugerdil 91] P. Dugerdil, "Inheritance mechanisms in the Objlog Langage: multiple selective and multiple vertical with points of view", In M. Lenzerini, D. Nardi, and M. Simi, eds., Inheritance Hierarchies in Knowledge Representation and Programming Languages", pp 245-256, John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [Ferber 88] J. Ferber, "Coreferentiality : The key to an Intentional Theory of Object-Oriented Knowledge Representation", In J. Demongeot, T. Herve, V. Rialle, C. Roche eds, Artificial Intelligence and Cognitive Science, Chap 6, Manchester University Press, 1988.
- [Ferber Volle 88] J. Ferber, PH. Volle, "Using coreference in object oriented representations", Proceedings of the European Conference of Artificial Intelligence, ECAI 88, pp 238-240, 1988.
- [Garlatti 91] S. Garlatti, "Inheritance of properties and default logic", 1st World Conference on the Fundamentals of Artificial Intelligence, WOCFAI '91, Paris 1-5 Juillet 1991.
- [Garlatti 93] S. Garlatti, "Default logic models of inheritance systems with exceptions", Fundamentae informatica, special issue: algebraic logic and its applications Vol 18, Numbers 2, 3, 4 February-April 1993, pp 129-150, 1993.
- [Garlatti Kanellos 93] S. Garlatti, I. Kanellos, "Les objets comme représentations des catégories naturelles ou artefactuelles", RPO 93, La Grande Motte, 17-18 Juin, 1993.
- [Goldstein Bobrow 80] P. Goldstein, BD. G. Bobrow, "Extending with Object-Oriented Programming in SMALLTALK," Conference Record of the 1980 LISP Conference, Standford, 1980.

- [Marino 89] O. Marino, "Classification d'objets dans un modèle multi-points de vue", Rapport de DEA, Laboratoire ARTEMIS/IMAG, INPG, 1989.
- [Marino et al. 90] O. Marino, F. Rechenmann, P. Uvietta, "Multiple Perspectives and classification mechanism in object-oriented representation", In the proceedings of the 9th european conference on Artificial Intelligence (ECAI 90), pp 425-430, 1990.
- [Markowitz et al. 92] J. A. Markowitz, J. T. Nutter, M. W. Evens, Beyond is-a and Part-Whole : More Semantic Network Links, Computers Math. Applic. vol 23, n° 6-9, p 377-390, 1992.
- [Mervis Rosch 81] C.B. Mervis, E. Rosch, "Categorization of natural objects", Ann. Rev. Psychol. Vol 32, pp 89-115, 1981.
- [Montabord et al. 93] E. Montabord, B. Gibaud, C. Barillot, S. Garlatti, I. Kanellos, B.S. Wu, A. Biraben, S. Morandi, "An hypermedia system to manage anatomical knowledge about brain", CAR' 93, June , Berlin, 1993.
- [Nguyen Rieu 91] G. T. Nguyen, D. Rieu, "Database Issues in Object Oriented Design," Tools'91, Paris, 1991.
- [Rieu et al. 91] D. Rieu, G. T. Nguyen, A. Culet, J. Escamilla, C. Djeraba, "Instanciation Multiple et Classification d'Objets," VIIèmes Journées Bases de Données Avancées, Lyon, 1991.
- [Rosch Mervis 75] E. Rosch & C. Mervis: "Family resemblances: studies in the internal structure of categories"; Cognitive Psychology, 1975, 7, pp. 573-605.
- [Winston et al. 87] M. E. Winston, R. Chaffin, D. Herrmann, A Taxonomy of Part-Whole Relations, Cognitive Science, n°11, pp. 417-444, 1987.